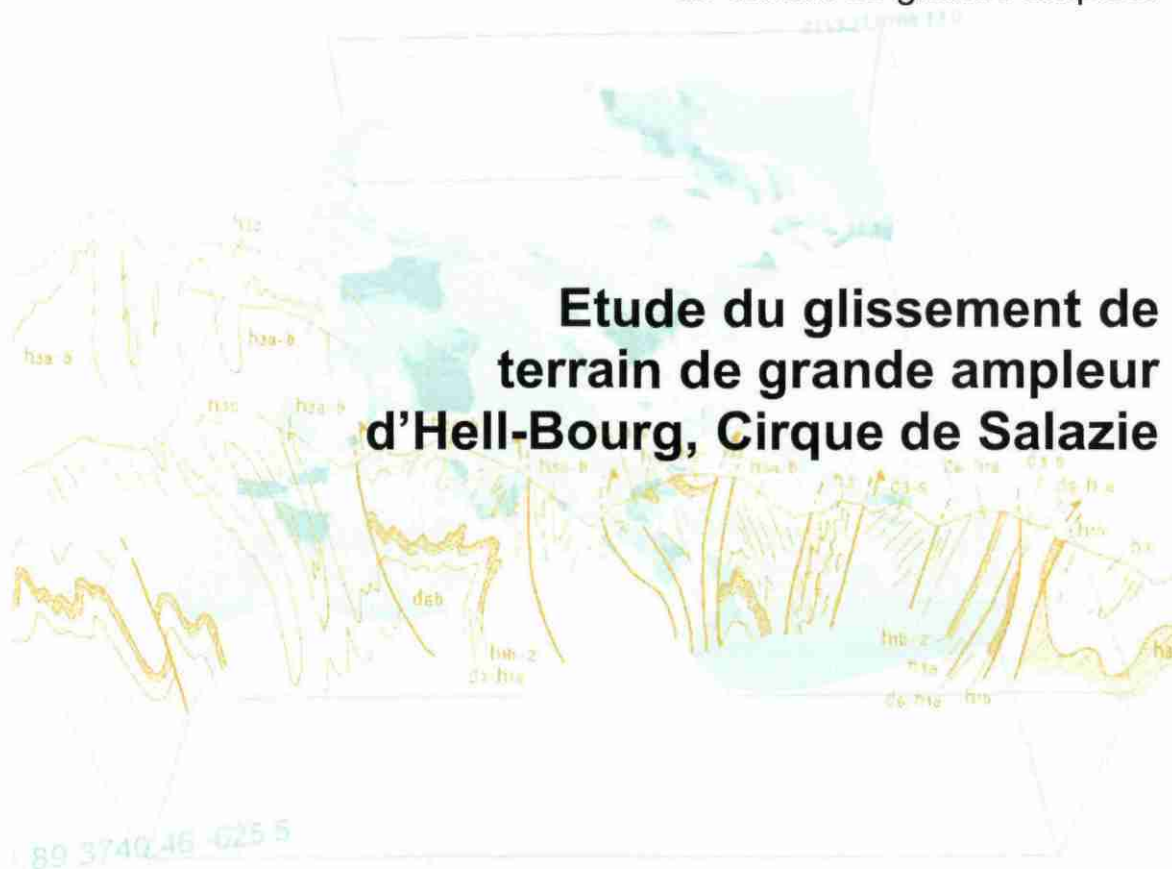


Document public

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 3 : Suivi des mouvements
Sous-module 3.1 : Etude des mouvements
de terrain de grande ampleur



BRGM/RP-56725-FR
Octobre 2008



Direction Départementale de
l'Équipement de La Réunion



Document public



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 3: Suivi des mouvements
Sous-module 3.1 : Etude des mouvements
de terrain de grande ampleur

Etude du glissement de terrain de grande ampleur d'Hell-Bourg, Cirque de Salazie

BRGM/RP-56725-FR
Octobre 2008

Travaux réalisés dans le cadre du projet de
recherche BRGM RISR15

C. Garnier, E. Lucas

Vérificateur :

Nom : M. CRUCHET

Date : 01/10/08

Signature :

Approbateur :

Nom : J.L. NEDELLEC

Date : 01/10/08

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 : Mouvement de terrain, glissement, programme de recherche MVTerre, GPS, Hell-Bourg, Mare à Poule d'Eau, Salazie, Ile de La Réunion.

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

C. Garnier et E. Lucas (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.

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

Synthèse

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.

Le présent rapport s'inscrit dans le sous-module 3.1 (« Etude des mouvements de terrain de grande ampleur ») et synthétise les données acquises sur le glissement de terrain de grande ampleur d'Hell-Bourg, situé dans le Cirque de Salazie. Hell-Bourg a été choisi comme site-pilote compte-tenu de son caractère exceptionnel, au regard à la fois de l'importance de la zone en mouvement et des enjeux – en particulier humains – concernés.

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 volet 3 (sous-module 3.1) prévoyait l'instrumentation de zones en mouvements ; les sites-pilotes étant équipés de bornes géodésiques supplémentaires, de stations GPS permanentes et de pluviomètres avec pour objectif de progresser dans la connaissance sur la répartition spatiale des mouvements et sur la relation pluies/déplacements.

- Les deux principales campagnes de mesure réalisées sur le réseau géodésique d'Hell-Bourg/Mare à Poule d'Eau (constitué d'une trentaine de bornes) ont permis de mettre en évidence les principaux points suivants :

- **Existence d'un mouvement d'ensemble orienté selon une direction générale vers le Nord.** Seules quelques bornes, situées sur la bordure septentrionale du plateau d'Hell-Bourg d'une part et sur Ilet à Vidot d'autre part montrent une composante ouest ou est significative, mais qui est vraisemblablement due au contexte topographique « local » (« appel au vide » en bordure de plateau, mouvements secondaires plus superficiels), ne remettant pas en question la direction générale du glissement.

- **La bordure Nord-ouest de Mare à Poule d'Eau ainsi que le secteur de Fond de Rond Point constituent les zones du glissement les plus actives.** Les vitesses moyennes de déplacements planimétriques y sont comprises entre 1 m/an et 1,70 m/an environ. On observe sur ces secteurs une décroissance des mouvements vers l'arrière - vers le Sud - du glissement, les terrains les plus actifs se trouvant « au contact » de la Rivière du Mât.

- **Les villages d'Hell-Bourg et de Mare à Poule d'Eau ne sont pas directement concernés par le phénomène** (vitesses de déplacement planimétriques - de l'ordre de 1,5 cm/an - non significatives). Sur Hell-Bourg, les mouvements n'affectent que la bordure Nord du plateau, sur une largeur de 50 m à 70 m environ (vitesses planimétriques moyennes de l'ordre de 12 cm/an). Sur Mare à Poule d'Eau, seuls l'ancienne école et le lotissement des Bambous, en limite Sud du village, sont affectés par des mouvements qui sont vraisemblablement liés à un phénomène de décompression en arrière de la bordure du plateau.

○ **Ilet à Vidot est en grande partie situé à l'intérieur de l'emprise du glissement.** Les vitesses de déplacement augmentent vers le Nord, passant de 4 cm/an environ à près de 20 cm/an dans la pointe septentrionale, ce qui témoigne d'une activité soutenue.

○ **La superficie de la zone glissée a été estimée en première approche à environ 4,5 km².**

▪ Les reconnaissances de terrain réalisées dans le cadre du programme de recherche ont souligné le fait que **le phénomène était étroitement lié au contexte géologique et structural**. Le glissement correspond à une remobilisation de différentes unités bréchiques (notamment la formation de Mare à Poule d'Eau), héritage de phénomènes gravitaires anciens de grande ampleur ayant affecté les flancs du Piton des Neiges. La base du glissement repose sur des Brèches Noires, matériaux fortement altérés représentant une surface de décollement privilégiée, tandis que la limite amont de la zone glissée correspond à un accident tectonique qui a vraisemblablement joué un rôle prépondérant dans le déclenchement du phénomène.

▪ Le dispositif associant station GPS permanente et pluviomètre est opérationnel depuis fin 2003. Les déplacements enregistrés par la station GPS permanente, fixe, sont conformes, en valeur comme en orientation des mouvements, aux déplacements issus du réseau géodésique.

L'analyse combinée de la pluviométrie et des déplacements enregistrés sur la station GPS fixe, réalisée à partir du logiciel Tempo (développé par le BRGM), tend à mettre en lumière le fait que la relation directe entre ces deux paramètres est linéaire. Les simulations indiquent notamment :

- que les déplacements sont directement proportionnels à la quantité d'eau tombée au cours de la saison humide (et donc en mesure de s'infiltrer dans la zone en mouvement et de mettre en pression la surface de glissement) ;
- que l'occurrence de saisons cycloniques très arrosées ne génère pas « d'emballlement » (accélération paroxysmale) du glissement ;
- qu'il est nécessaire de dépasser cumul pluviométrique d'environ 1200 mm sur la saison pluvieuse pour que les mouvements connaissent une accélération significative.

▪ Les investigations réalisées dans le cadre du programme de recherche Mvterre ont permis de progresser dans la connaissance du glissement (notamment sur la délimitation des zones actives et sur l'ampleur des déplacements) et dans la compréhension du mécanisme, en particulier sur la relation « pluies/déplacements ». Les enseignements sur ce dernier point, qui s'appuient sur l'utilisation du logiciel Tempo, doivent cependant être considérés avec précaution, dans la mesure où la plage d'enregistrement pluies/déplacements est relativement limitée et le nombre d'épisodes pluvieux exceptionnels exploitables peut apparaître insuffisant.

Seule la poursuite du travail d'acquisition et d'analyse permettra de conforter ces avancées et de mieux appréhender le comportement du glissement face aux épisodes pluvieux exceptionnels.

Sommaire

SYNTHESE	4
SOMMAIRE.....	6
LISTE DES ILLUSTRATIONS.....	7
BIBLIOGRAPHIE.....	9
1 INTRODUCTION	12
2 PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE	13
2.1 LOCALISATION	13
2.2 CONTEXTE GEOLOGIQUE	14
2.3 CONTEXTE HYDROGEOLOGIQUE.....	17
2.4 CONTEXTE CLIMATIQUE	20
3 ACTIVITE MVT SUR LE PLATEAU	22
3.1 CONNAISSANCES HISTORIQUES	22
3.1.1 <i>Analyse photo-interprétative</i>	22
3.1.2 <i>Observations de terrain</i>	32
3.2 SUIVI DES BORNES GEODESIQUES MVTERRE	50
3.3 STATION GPS PERMANENTE	59
3.3.1 <i>Déplacements planimétriques</i>	59
3.3.2 <i>Déplacements altimétriques</i>	62
4 MECANISMES DE MOUVEMENT.....	63
4.1 APPROCHE SUR LA RELATION PLUIES / MOUVEMENTS	63
4.1.1 <i>Données brutes</i>	63
4.1.2 <i>Modèles prévisionnels</i>	67
4.1.3 <i>Remarques</i>	73
4.2 DYNAMIQUE DE MOUVEMENT	73
5 CONCLUSIONS	77
ANNEXES	79

Liste des illustrations

Figure 1 : Situation de la zone d'étude au sein du Cirque de Salazie (IGN 1/100 000 et 1/25 000).....	13
Figure 2 : Brèches Noires argileuses – secteur Bras Sec	15
Figure 3 : Faciès « mixte » de la série des brèches de Mare à Poule d'Eau.....	16
Figure 4 : Extrait carte géologique P. Chevalier 2003 – Cirque de Salazie au 1/10 000 (ici réduite au 1/14 000)	18
Figure 5 : Coupe schématique interprétative du glissement d'Hell-Bourg / Mare à Poule d'Eau	19
Figure 6 : Pluviométrie enregistrée par quinzaine sur le poste d'Ilet à Vidot (alt. 945 m), sur la période Février 2004/Avril 2008.....	21
Figure 7 - Localisation des effondrements affectant le versant d'Hell-Bourg (cliché IGN 1961)	23
Figure 8 - Coulée de débris au Sud de l'Ilet à Vidot (cliché IGN 1961)	24
Figure 9 - Erosion de versants (cliché IGN 1961).....	25
Figure 10 - Comparaison du niveau d'eau de la mare à Poule d'eau entre 1978 (lignes Iso en bleu) et 2003 (lignes Iso en blanc)	26
Figure 11 - Principales traces d'instabilités visibles sur le cliché IGN 1978	27
Figure 12 - Principales traces d'instabilités visibles sur le cliché IGN 1984 (Post-Hyacinthe).....	29
Figure 13 - Evolution du recul de la bordure Est d'Ilet à Vidot entre 1961 et 2003	31
Figure 14 : Bombement de la RD48 au front du glissement (cliché pris au droit de l'ouvrage de franchissement de la ravine drainant la mare à Poule d'Eau – point coté IGN 533 m).....	33
Figure 15 : Réseau de fissures décrochantes affectant la RD48 – Secteur dit des « tournants bambous »	34
Figure 16 : Lotissement des Bambous (partie sud-ouest de Mare à Poule d'eau) - localisation des désordres observés fin 2003 et délimitation de la zone active (extrait rapport BRGM/RP-51105-FR)	35
Figure 17 : Fissure active dans l'emprise de l'ancienne école de Mare à Poule d'Eau.....	36
Figure 18 : Fissure active dans le lotissement des Bambous.....	36
Figure 19 : vue partielle du secteur de Fond de Rond Point - en arrière plan l'escarpement du plateau d'Hell-Bourg.....	37
Figure 20 : Faille active avec rejeux ? plurimétriques.....	37
Figure 21 : Zones de départ et axe de propagation de la coulée boueuse de la mare à Poule d'Eau (janvier 1980)	39
Figure 22 : Escarpement d'Hell-Bourg.....	40
Figure 23 : Zone de départ au niveau du kiosque du glissement-coulée de 1980	40
Figure 24 : Fissures de décompression en arrière de l'escarpement d'Hell-Bourg - secteur du kiosque	41
Figure 25 : Partie Nord d'Ilet à Vidot et versant rive gauche de la ravine Bras Sec.....	42

Figure 26 : Localisation des cicatrices et indices d'activité d'Ilet à Vidot illustrés sur les figures qui suivent	43
Figure 27 : Point 1 – Fissuration de la chaussée au début du Chemin Manouilh (après Gamède).....	43
Figure 28 : Point 2 – fracture ouverte N160° avec cisaillement dextre (apparition 2-3 ans) Chemin Manouilh.....	44
Figure 29 : Point 3 – Faille normale ancienne N140°. Chemin Manouilh	45
Figure 30 : Point 4 – Continuité vers l'Ouest de la faille visible sur la figure 3, au niveau du Chemin Manouilh	45
Figure 31 : Point 5 - Continuité vers l'Est de la faille visible sur la figure 3 (construction en surplomb de la route d'Hell-Bourg RD 48)	46
Figure 32 : Point 6 – Fissuration de la RD 48 descendant vers le Bras Fontaine (direction N160°).....	46
Figure 33 : Point 7 – Faille normale direction N140°	47
Figure 34 : Point 9 – Niche d'arrachement métrique en bordure nord de l'îlet (cliché gauche). Fissure ouverte direction N/S (en partie remblayée) dû à la décompression du versant en direction du Bras Fontaine (cliché à droite).....	47
Figure 35 : point 10 – Recul d'une dizaine de mètres de la bordure Est de l'îlet suite à Gamède.	49
Figure 36 : Point 10 – Vue en direction du secteur Fond de Rond Point depuis le point 10	49
Figure 37 : Localisation des bornes du réseau géodésique MVTerre d'Hell-Bourg/Mare à Poule d'Eau.....	53
Figure 39 : Déplacements annuels moyens (planimétriques) relevés sur la période 2003/2007 et représentation de la direction du mouvement.....	54
Figure 40 : Réseau observé dans le cadre du suivi des déformations de la RD48	55
Figure 41 : Comparatif entre les résultats (vitesses moyennes et gisement) du suivi RD48 (en rouge - période 1995/2001) et ceux du suivi MVTerre (en bleu - période 2003/07).....	56
Figure 42 : Vue générale partie septentrionale de la zone en mouvement	57
Figure 43 : Vue générale du plateau d'Hell-Bourg et partie sud de Fond de Rond Point.....	58
Figure 44 : Localisation station GPS permanente (et bornes géodésiques MVTerre).....	59
Figure 45 : Station GPS permanente d'Hell-Bourg – déplacements en X	60
Figure 46 : Station GPS permanente d'Hell-Bourg – déplacements en Y	60
Figure 47 : Orientation du déplacement	61
Figure 48 : Station GPS permanente d'Hell-Bourg – déplacements en Z	62
Figure 49 : Mise en parallèle « Déplacement, direction nord / Pluviométrie ».....	63
Figure 50 : Mise en parallèle « Vitesse de déplacement, direction Est / Pluviométrie »	64
Figure 51 : Relation pic de pluies / pic de vitesse de déplacement	66
Figure 52 : Corrélation pluies/déplacements cumulés sur la période correspondant à la saison cyclonique.....	66
Figure 53 : Modèle sous Tempo	67

Figure 54 : Reconstitution des déplacements grâce à Tempo	68
Figure 55 : Simulation Tempo – scénario 1	69
Figure 56 : Simulation Tempo – scénario 1, relation pluies/déplacements	69
Figure 57 : Simulation Tempo – scénario 2	70
Figure 58 : Simulation Tempo – scénario 2, relation pluies/déplacements	70
Figure 59 : Simulation Tempo – scénario 2, relation pluies/déplacements en fonction de l'intensité des cyclones	71
Figure 60 : Simulation Tempo – scénario 3	71
Figure 61 : Simulation Tempo – scénario 3, relation pluies/déplacements	72

Liste des tableaux

Tableau 1 : Synthèse des données Météo France dans les 4 stations en service dans le cirque (données Météo-France, 2001)	20
Tableau 2 : Pluies quotidiennes du 15 au 27 janvier 1980 (Pinchinot, 1984)	20
Tableau 3 : Ecart enregistrés entre novembre 2007 et février 2008 sur les stations MVTerre implantées en 2007	52

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.

Bellanger A. , Aunay B. (2008) - Suivi des glissements de Hell-Bourg et de Grand Ilet 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

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

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

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.

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

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 Ilet 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, Ile 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, Ile 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. (2008) – Etude du glissement de terrain de grande ampleur de Grand Ilet, Cirque de Salazie – Ile 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

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

Humbert. M, Pasquet R et Stieltjes L. (1981) – Les risques géologiques dans les cirques de Salazie et de Cilaos. 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

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 debris avalanches on the flanks of the volcanic islands – the Canary Islands - – In Landslide News # 9, pp. 21-24

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

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

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.

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 volet 3 (« Etude de la dynamique des glissements de terrain de grande ampleur ») du programme prévoyait également, dans le cadre du sous-module 3.1, l'instrumentation de zones en mouvements, ayant un caractère exceptionnel au regard de l'importance de la superficie touchée et des enjeux concernés. Ces sites-pilotes, qui correspondent aux glissements de terrain de grande ampleur de Grand Ilet et d'Hell-Bourg dans le Cirque de Salazie, ont notamment été équipés de bornes géodésiques supplémentaires, de stations GPS permanentes et de pluviomètres avec pour objectif de progresser dans la connaissance sur la répartition spatiale des mouvements et sur la relation pluies/déplacements.

Le présent rapport, qui s'inscrit dans le cadre du rendu du sous-module 3.1, synthétise les données acquises dans le cadre du programme MVTerre concernant le glissement d'Hell-Bourg, et présente notamment l'exploitation des résultats du suivi géodésique en liaison avec la pluviométrie enregistrée au niveau du pluviomètre automatique mis en place fin 2003 sur le plateau.

2 Présentation de la zone d'étude

2.1 Localisation

La zone d'étude se situe dans la partie orientale du cirque de Salazie, à 5 km environ au Nord-Est du Piton des Neiges et à 2 km environ, pour ce qui concerne sa partie septentrionale, au Sud-Ouest du bourg de Salazie. Elle comprend trois principales zones d'urbanisation, accessibles par - la RD48 :

- au Nord, le village de Mare à Poule d'Eau, installé sur un plateau entre les altitudes 720 m dans la partie Sud et 650 m environ au Nord. Marqué à sa pointe septentrionale par le Cap Banane, le plateau est délimité à l'Est par le Bras des Demoiselles, affluent rive droite de la Rivière du Mât, et à l'Ouest par la dépression de la mare à Poule d'Eau (altitude 670 m environ). Le plateau domine de 150 m à 200 m le cours de la Rivière du Mât.

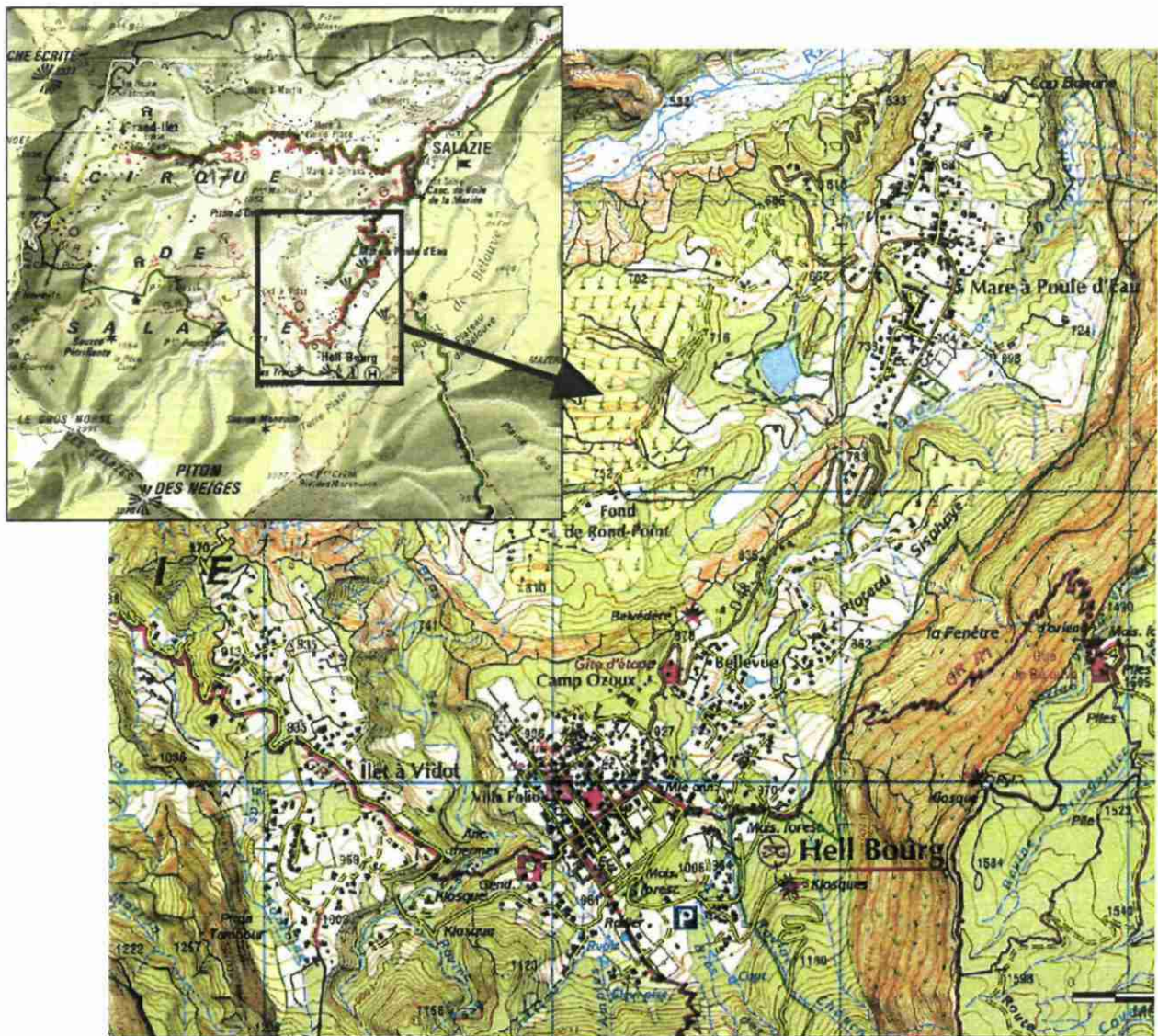


Figure 1 : Situation de la zone d'étude au sein du Cirque de Salazie (IGN 1/100 000 et 1/25 000)

- au Sud-Ouest de Mare à Poule d'Eau, le village d'Hell-Bourg occupe un plateau situé vers l'altitude moyenne de 950 m. Il est délimité au Nord par un escarpement d'une hauteur moyenne de 100 m environ, se prolongeant en direction du plateau de Mare à Poule d'Eau et surplombant le secteur de Fond de Rond Point. A l'Est, la limite est matérialisée par le versant rive droite de la Ravine Bras Sec, d'une hauteur de 50 m à une centaine de mètres environ ;
- à l'Ouest d'Hell-Bourg, l'Ilet à Vidot se développe sur un plateau d'altitude globalement décroissante vers le Nord, depuis 1020 m à 900 m environ. Rattaché au Sud au rempart du Cirque de Salazie, il est délimité à l'Est par la Ravine Bras Sec et à l'Ouest par la Ravine Bras Fontaine.

2.2 Contexte géologique

De forme sensiblement circulaire et d'un diamètre voisin de 10 km, le Cirque de Salazie correspond à une immense forme d'effondrement du Piton des Neiges, dont la morphologie a été façonnée au fil du temps par de nombreux épisodes volcaniques et par des phénomènes érosifs intenses. Salazie, tout comme les cirques voisins de Cilaos et Mafate, a une origine morpho-tectonique récente (Chevallier, 1979), c'est-à-dire que les effondrements étant à leur origine sont guidés par les discontinuités structurales découpant le massif mais sont aussi causés par l'érosion.

- Les formations anciennes :

Le substratum de la zone d'étude est constitué de laves et de brèches anciennes, attribuées aux phases I et II de Billard et Vincent (< 430 000 ans), dont les facies sont très largement zéolitisés et hydrolysés. On retrouve à l'affleurement ce substratum volcanique au Nord du plateau de Mare à Poule d'Eau, dans la partie inférieure du versant en contrebas du Piton Banane et à l'Est de celui-ci (versant rive gauche du Bras des Demoiselles), à l'Est d'Hell-Bourg formant l'ossature de l'escarpement dominant le quartier de Bellevue, et dans la partie Sud d'Ilet à Vidot au niveau notamment des versants de la Ravine des Trois Cascades.

Les formations bréchiques surmontant ce substratum volcanique sont notamment issues d'un événement majeur (daté à environ 28 000 ans cf. travaux de P. Chevalier, *et al.* dans le cadre du projet MVTerre) vraisemblablement de type avalanche de débris se propageant sur une distance de l'ordre de quelques kilomètres, et mobilisant tout le matériel lavique situé à l'Ouest de la faille Est de Salazie (celle-ci formant un corridor se situant en alignement avec le rempart Sud-est du cirque). L'ensemble déstabilisé s'est propagé au contact des séries volcaniques anciennes, subissant d'intenses déformations conduisant à la formation de différents faciès de bréchification plus ou moins avancée.

Ces brèches sont globalement assez consolidées. Elles présentent une cohésion variable, mais généralement suffisante pour assurer une certaine tenue de talus de hauteur plurimétrique parfois très raide.

P. Chevalier, dans ses travaux de cartographie du cirque de Salazie (programme MVTERRE – module 1.1 – rapport BRGM RP-52681-FR) distingue les formations bréchiques suivantes :

- les Brèches Noires.

Cette formation s'est développée au toit du substratum hydrothermalisé des séries anciennes, à l'interface sous la puissante série de Mare à Poule d'Eau. Elle est assez bien représentée dans la Rivière du Mât, en amont du Pont de la Savane. Formée à partir du remaniement des brèches anciennes, déjà altérées et zéolitisées, elles se présentent sous la forme de brèches matricielles, compactes, à matrice fréquemment argileuse.



Figure 2 : Brèches Noires argileuses – secteur Bras Sec

- La formation de Mare à Poule d'Eau :

Les différents faciès bréchiques constituant cette unité constituent un ensemble complexe et « bigarré », s'inscrivant dans un éventail compris entre un pôle peu « évolué », où peuvent se reconnaître les structures volcaniques originelles (alternance de coulées laviques de basaltes et de niveaux de tufs à scories/lapilli), et un pôle « mixte » (brèches non litées plus matricielles, plus polygéniques, où se retrouvent les mêmes niveaux laviques mais en clastes isolés).

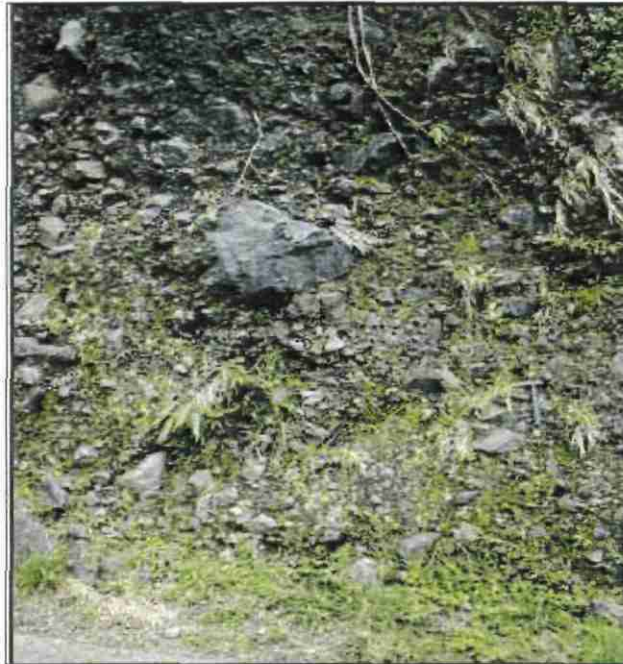


Figure 3 : Faciès « mixte » de la série des brèches de Mare à Poule d'Eau

- La formation d'Ilet à Vidot.

Ces brèches sont issues d'un remaniement important des séries zéolitisées anciennes, associées à des éléments de laves très différenciées. D'autres faciès très polygéniques sont aussi présents, assez peu matricielles.

Ces formations bréchiques sont, au sein de la zone d'étude, très largement recouvertes de **formations superficielles**, dont l'épaisseur varie de quelques décimètres à plusieurs décamètres. Il s'agit :

- de formations de pentes, parmi lesquelles on peut en particulier distinguer les colluvions (présentes sous forme de brèches assez matricielles et ouvertes) largement représentées sur les plateaux de Mare à Poule d'Eau et Hell-Bourg, ainsi qu'au niveau de Fond de Rond Point et Ilet à Vidot, et les éboulis (brèches ouvertes à matrice terreuse souvent pulvérulente, le plus souvent polygéniques, parfois très grossières) largement répandus en plaquages vifs ou végétalisés.
- de formations alluvionnaires, avec toutes les variations possibles entre des alluvions torrentielles et des alluvions plus fines, sableuses. On les rencontre notamment dans la dépression du Bras des Demoiselles et dans la partie orientale du plateau de Mare à Poule d'Eau, dans la ravine drainant la mare à Poule d'Eau, ainsi que dans le fond de la Rivière du Mât et de la Ravine Bras Sec.

2.3 Contexte hydrogéologique

Les sources pérennes recensées au sein de la zone d'étude (cf. **Figure 4**) sont peu nombreuses. On citera notamment les résurgences alimentant la mare à Poule d'Eau, situées au pied du rempart d'Hell-Bourg, environ 200 m en amont de la dépression.

D'autres sources temporaires prendraient naissance à l'occasion de périodes fortement arrosées, préférentiellement soit quelques mètres en contrebas des têtes de versants (escarpements de Mare à Poule d'Eau et d'Hell-Bourg, versants de la ravine Bras Sec notamment), soit au pied des remparts. Selon les témoignages recueillis, ces sources s'assèchent assez rapidement (quelques jours) après la fin de l'épisode pluvieux.

Le faible nombre d'émergences recensées dans l'emprise de la zone en mouvement pourrait s'expliquer par le fait que la zone d'étude apparaît bien drainée par un réseau hydrographique superficiel relativement bien développé, assurant la collecte et l'évacuation des eaux de ruissellement (cf. **Figure 1**). Il semble ainsi qu'en période de forte pluviométrie, ce réseau soit en mesure de reprendre une part non négligeable des ruissellements avant que ceux-ci ne puissent rejoindre la zone en mouvement et éventuellement s'y infiltrer.

Le Bras des Demoiselles prend naissance au Sud du village d'Hell-Bourg avant de s'écouler suivant une direction Nord, passant en bordure orientale du plateau de Mare à Poule d'eau avant de rejoindre la Rivière du Mât. Ceinturant ainsi à l'Est la zone en mouvement, il draine l'ensemble des eaux provenant du rempart Est du cirque, hors zone active

La partie Sud de la zone d'étude est drainée par plusieurs petites ravines descendant du rempart, et donnant naissance d'une part au Bras Fontaine (qui matérialise la bordure Ouest d'Ilet à Vidot) et d'autre part à la ravine Bras Sec, qui marque la transition entre le plateau d'Hell-Bourg et Ilet à Vidot.

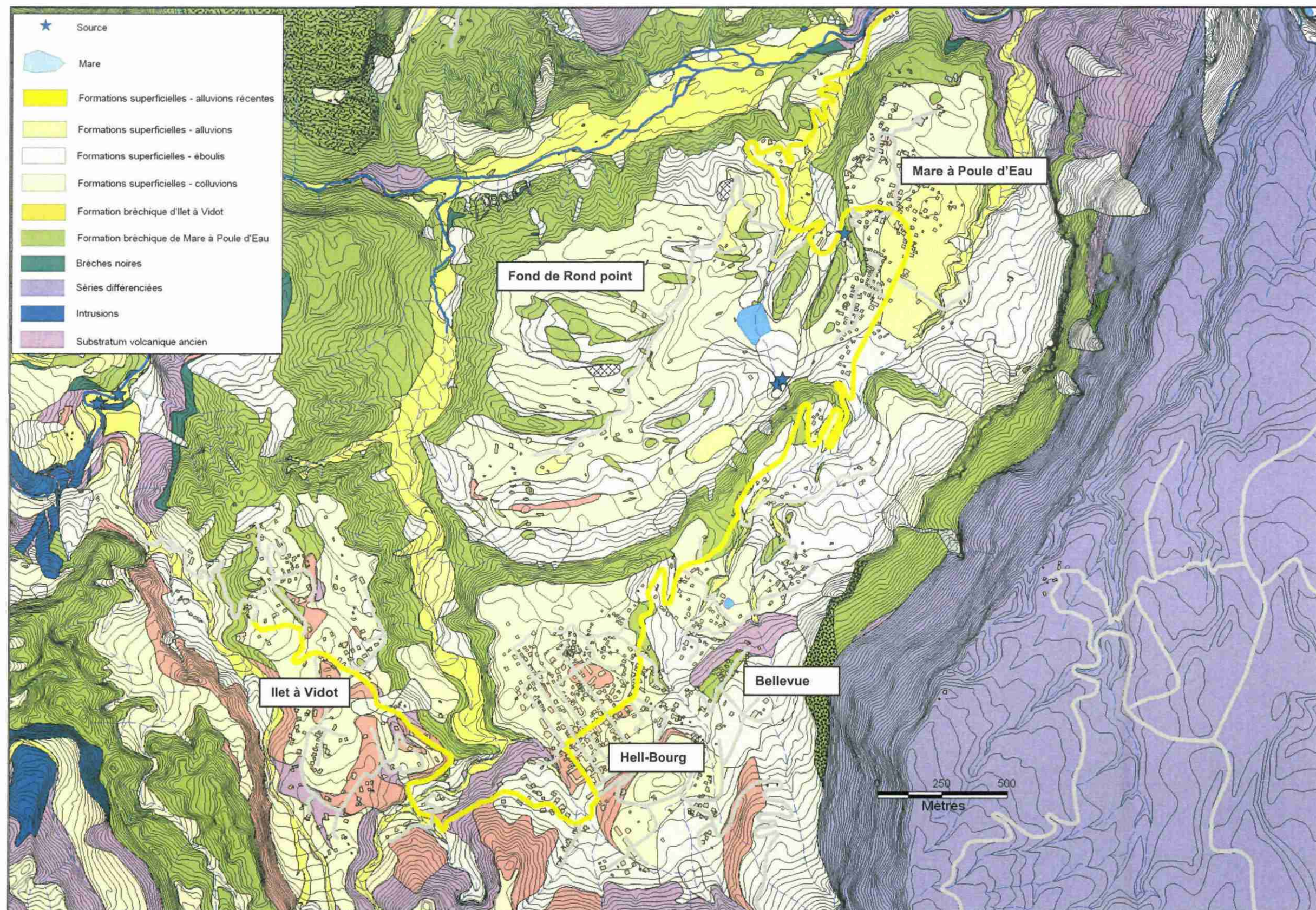


Figure 4 : Extrait carte géologique P. Chevalier 2003 – Cirque de Salazie au 1/10 000 (ici réduite au 1/14 000)

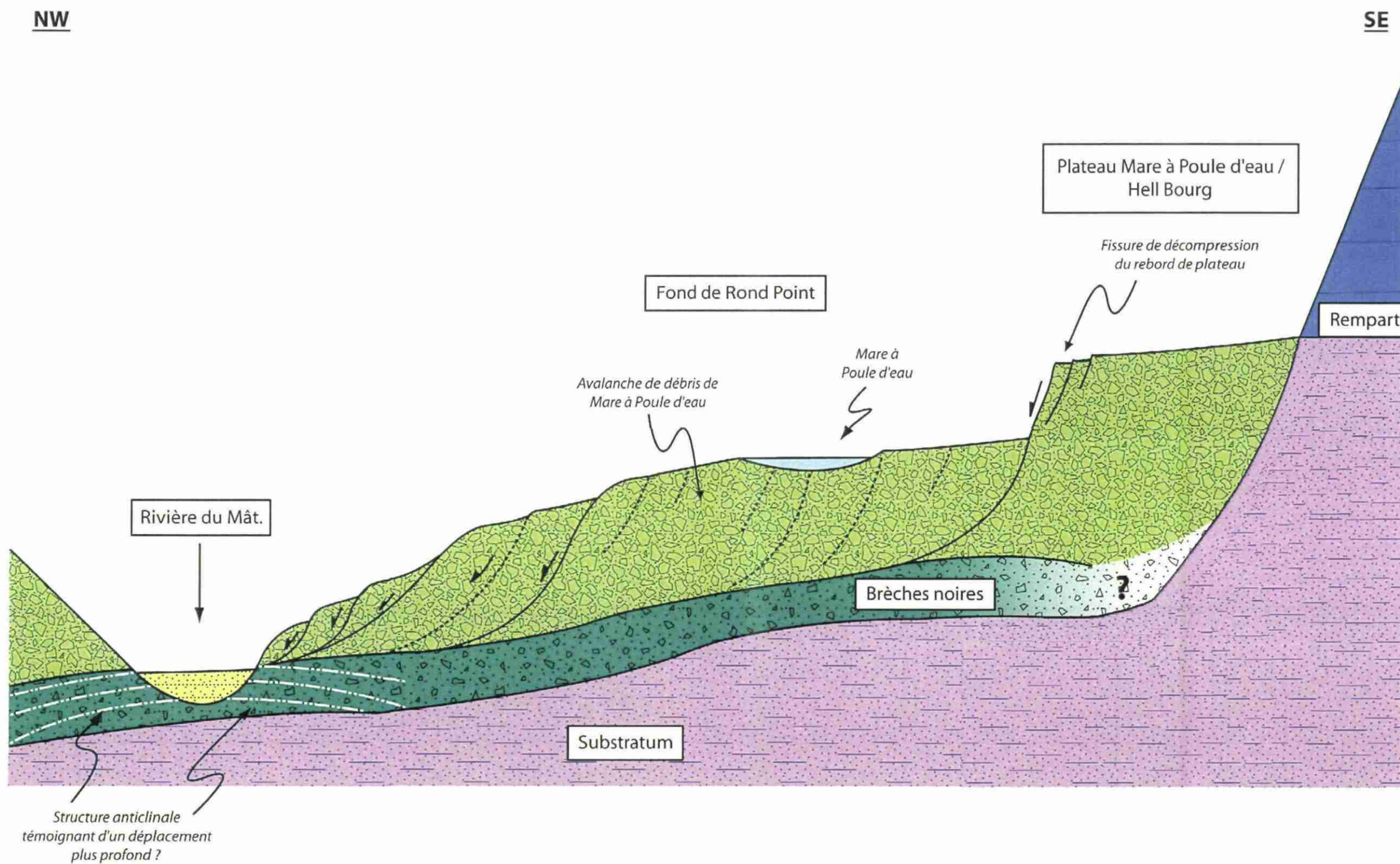


Figure 5 : Coupe schématique interprétative du glissement d'Hell-Bourg / Mare à Poule d'Eau

2.4 Contexte climatique

Il résulte notamment du climat tropical humide régnant à La Réunion des cumuls pluviométriques exceptionnels au cours de l'été austral (l'île détenant tous les records mondiaux de pluviométrie pour les périodes comprises entre 12h et 15 jours). Ces précipitations d'intensité, et parfois de durée, exceptionnelles constituent un élément moteur majeur dans de nombreux mouvements de terrain, dont une grande part se produit à l'intérieur des cirques ou à leur périphérie (remparts).

Salazie est le plus arrosé des trois cirques de La Réunion, ses remparts Ouest et Sud constituant l'ultime barrière pour les systèmes dépressionnaires arrosant périodiquement, et abondamment, l'Est et le Nord de l'île (au-delà de ces remparts commence « la côte sous le vent »). Salazie connaît ainsi un régime de précipitations très marqué (moyennes annuelles comprises entre 2,5 m et 5 m¹ suivant la localisation dans le Cirque) et constitue un des secteurs de La Réunion les plus exposés aux épisodes cycloniques. Le tableau ci-dessous présente les médianes des cumuls annuels de précipitations mesurées dans quatre stations Météo France implantées dans le cirque ou en bordure immédiate (BRGM/RP-51127-FR, 2001).

Station	Altitude	Médiane des cumuls annuels
Bélouve	1500 m	2966 mm (série 1956-2000)
Hell-Bourg	980 m	2959 mm (série 1952-2000)
Mare à Vieille Place	880 m	2476 mm (série 1990-2000)
Salazie village	476 m	3028 mm (série 1996-2000)

Tableau 1 : Synthèse des données Météo France dans les 4 stations en service dans le cirque (données Météo-France, 2001)

Le cyclone Hyacinthe (janvier 1980), qui fut à l'origine de désordres importants non seulement à Hell-Bourg et dans le cirque de Salazie, mais plus largement sur une grande partie de l'île, constitue l'épisode cyclonique le plus marquant de ces cinquante dernières années. Hyacinthe fut exceptionnel à la fois par l'importance des cumuls pluviométriques et par la durée de son influence sur La Réunion. Il a ainsi été enregistré à Grand Ilet (situé à 5 km environ au Nord-Ouest d'Hell-Bourg) un cumul de 5240 mm au cours de la seconde quinzaine de janvier.

Janvier 1980	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	Total
Station de Grand Ilet	3	94	172	171	240	164	160	391	360	858	706	1044	877	5240
Station d'Hell-Bourg	28	27	222	240	299	256	191	138	388	400	358	407	581	3535

Tableau 2 : Pluies quotidiennes du 15 au 27 janvier 1980 (Pinchinot, 1984)

¹ Ces cumuls annuels moyens, bien que remarquables - restent relativement modestes par rapport à ceux des flancs est du Massif du Piton de la Fournaise et de la zone de Takamaka (pluviométrie moyenne annuelle supérieure à 6000 mm, avec des valeurs supérieures à 10000 mm).

Alors que la pluviométrie horaire ou quotidienne est restée forte mais sans être exceptionnelle en terme d'intensité (100 mm maximum sur une heure - période de retour estimée entre 30 ans et 50 ans par Sogreah, 2000), c'est la durée de l'épisode pluvieux intense qui a conféré au phénomène une ampleur majeure (plus de 5200 mm en 13 jours).

A titre de comparaison, en février 1987, à l'occasion du passage du cyclone Clotilda, 2500 mm se sont déversés sur Grand Ilet en 6 jours, dont 1040 mm en 24 heures.

Au-delà de l'intensité des précipitations, le tableau précédent permet de souligner leur grande variabilité spatiale, en partie liée aux effets orographiques (encaissement, exposition et éloignement par rapport aux remparts environnants, etc.), les deux stations n'étant éloignées à « vol d'oiseau » que d'une demi-douzaine de kilomètres. Autre exemple illustrant cette variabilité, il est tombé 1324,5 mm le 05/03/06 sur le poste de Grand Ilet, contre « seulement » 687 mm sur le poste d'Ilet à Vidot (3202 mm contre 1891 mm sur la première quinzaine de mars, soit 70% de plus).

La **Figure 6** ci-après présente les cumuls relevés par quinzaine sur la période Février 2004/Avril 2008, sur le poste pluviométrique d'Ilet à Vidot.

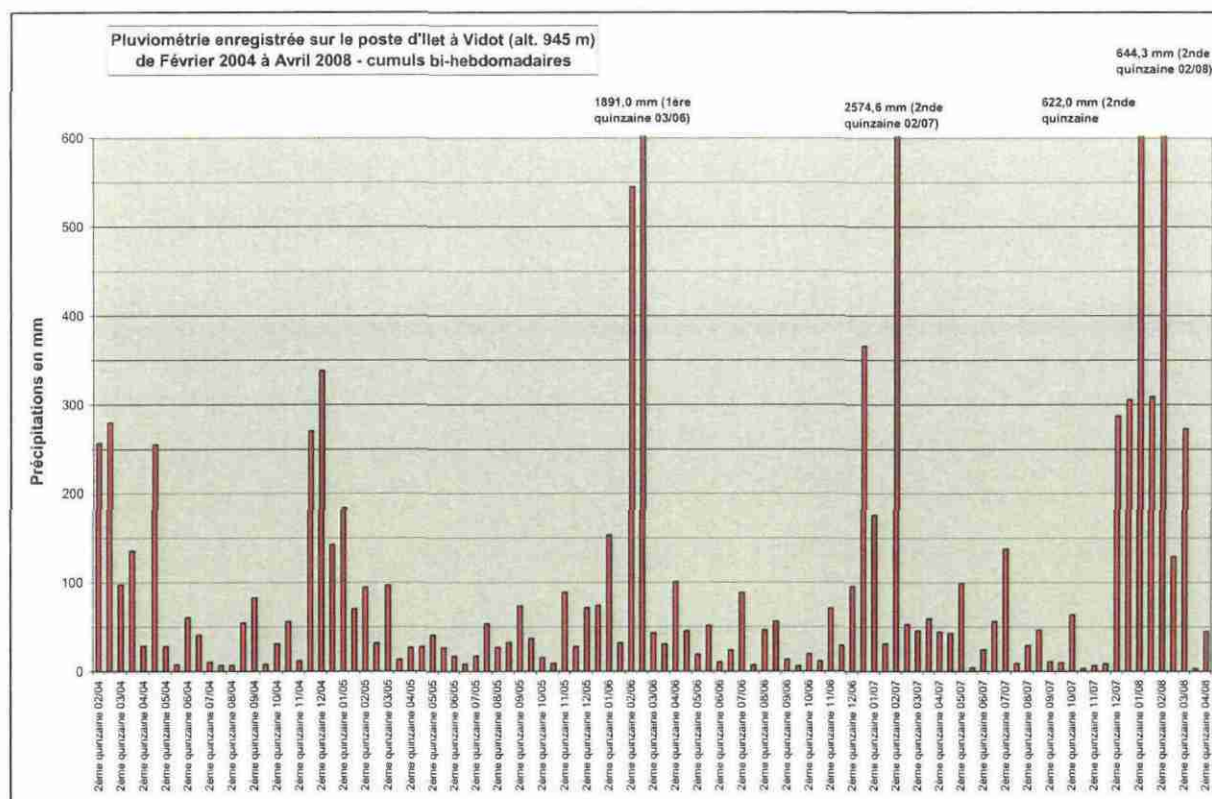


Figure 6 : Pluviométrie enregistrée par quinzaine sur le poste d'Ilet à Vidot (alt. 945 m), sur la période Février 2004/Avril 2008

3 Activité MVT sur le plateau

3.1 Connaissances historiques

3.1.1 Analyse photo-interprétative

L'évolution géomorphologique de la zone d'étude peut être analysée par vision stéréoscopique des photos aériennes de l'IGN de 1961, 1966, 1978 et 1984. Néanmoins, certaines photos manquantes n'ont pas permis une analyse complète de l'ensemble du territoire concerné d'une série à l'autre. De même, la variation de certains paramètres propres aux différentes campagnes de prise de vue (résolution, altitude et position du soleil) ne permet pas une analyse précise de l'évolution des reliefs : les effets d'ombrages peuvent cacher certains versants. Les observations effectuées pour les années 1997 et 2003 ont été réalisées à partir des orthophotographies de l'IGN en version numérique.

Entre chaque campagne une brève énumération des événements climatiques majeurs ayant affecté l'île a été réalisée.

- Analyse des clichés IGN 1961

Secteur d'Hell-Bourg –Mare à Poule d'eau :

Une érosion importante affecte (en amont de l'élevage piscicole) le versant de Bé Mahot (secteur situé au Sud d'Hell-Bourg). Elle est causée par un ravinement diffus qui entaille le versant. L'absence de végétation pour retenir les sols est un facteur aggravant ce qui a pu contribuer à la propagation de coulées boueuses. Deux cicatrices récentes d'effondrements sont par ailleurs visibles dans le versant d'Hell-Bourg (cf. **Figure 7**). La première est située à 150 m au Nord-est du belvédère et la seconde à 250 m au Sud-ouest. Les matériaux effondrés se sont stabilisés en pied de versant sous forme de cônes de propagation de volume supérieur à 10 000 m³.

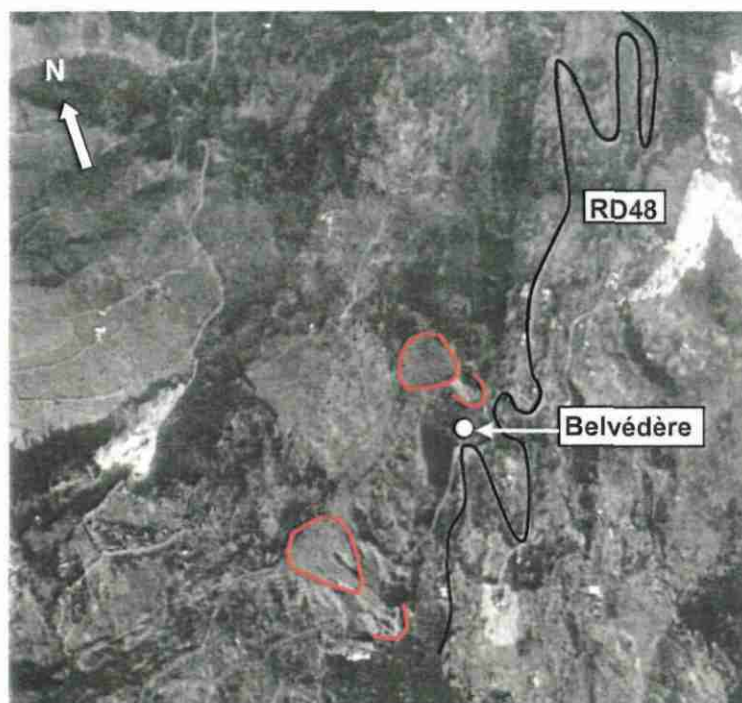


Figure 7 - Localisation des effondrements affectant le versant d'Hell-Bourg (cliché IGN 1961)

De même, le pied de versant est occupé sur toute sa longueur par des accumulations de matériaux qui témoignent d'effondrements passés. Il semble donc que ce type d'instabilité soit assez récurrent dans ce secteur.

Les versants Nord et Ouest du plateau de Mare à Poule d'eau sont soumis à une érosion intense (formations bréchiques peu indurées). L'absence d'accumulation de matériaux en pied de versant montre que la Ravine Bras Sec et la Rivière du Mat évacuent rapidement les masses effondrées. De même, l'érosion des berges par les eaux en crue pourrait être un des facteurs déclencheurs des instabilités (sapage du pied de versant).

Vers l'extrémité Nord-ouest du Plateau, deux arrêtes parallèles de direction NW-SE ressortent dans le versant (cf. **Figure 9**).

Secteur d'Ilet à Vidot :

En 1961 cet écart d'Hell-Bourg ne présentait que quelques maisons isolées étalées sur l'ensemble du plateau.

Une cicatrice d'effondrement est visible dans le rempart au droit du lieu-dit « les trois cascades ». Les matériaux déstabilisés semblent s'être transformés au cours de leur propagation en coulée de débris laissant une grande trainée marron bien visible dans le paysage. Le flux de matériaux a été dans un premier temps canalisé dans le lit de la Ravine Fontaine avant de s'étaler plus en aval en suivant deux bras distincts (cf. **Figure 8**).

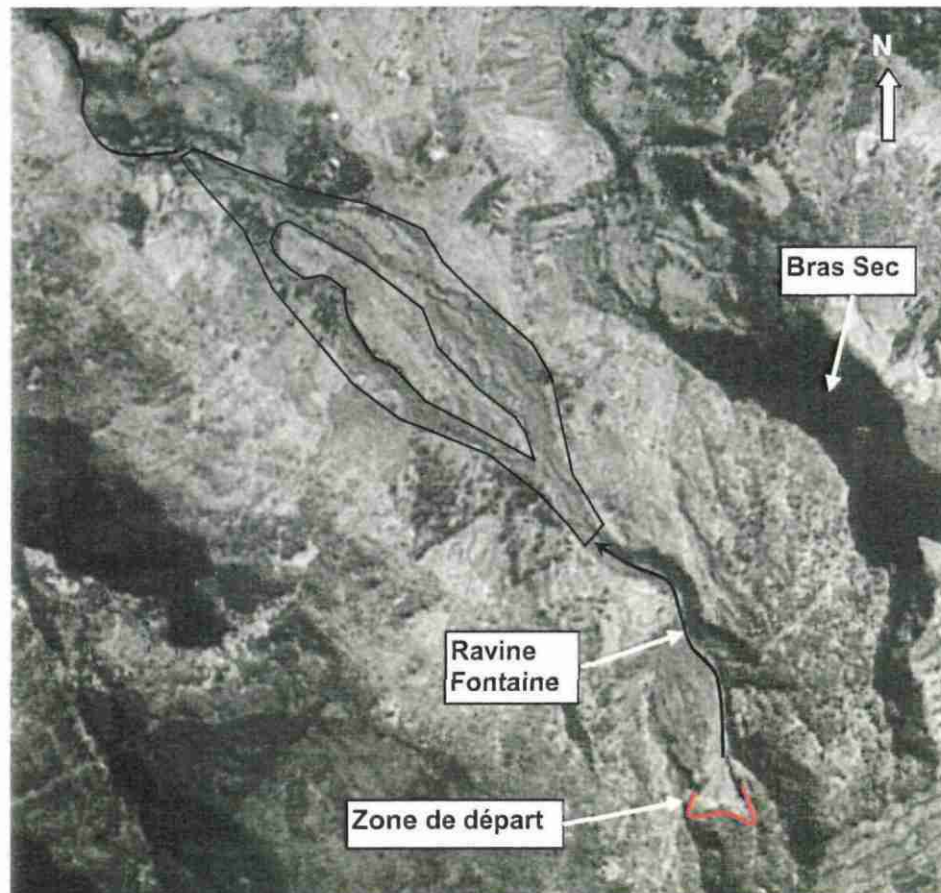


Figure 8 - Coulée de débris au Sud de l'îlet à Vidot (cliché IGN 1961)

Le versant Est de l'îlet présentent de nombreux talwegs d'axe W-E. L'érosion semble être plus importante dans la partie Nord du plateau : le versant est moins végétalisé et les talwegs plus incisés. Les effondrements qui s'y produisent contribuent fortement à l'alluvionnement de la Ravine Bras Sec qui présente en rive gauche un stock important de matériaux sous forme de cône d'éboulis.

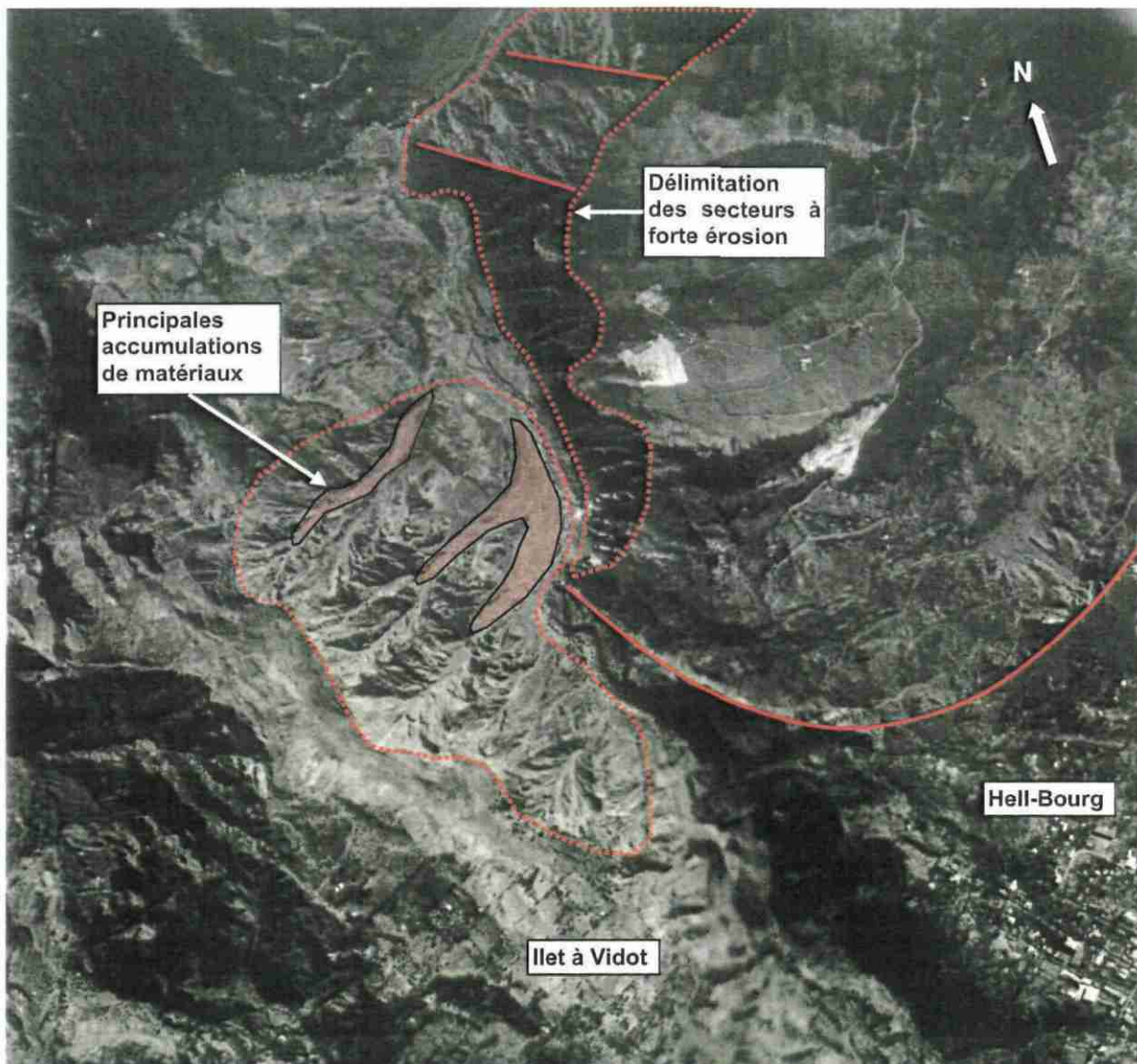


Figure 9 - Erosion de versants (cliché IGN 1961)

Entre 1961 et 1966, trois cyclones ont concerné La Réunion :

- 1962 : Jenny (28 Fév.) qui a engendré beaucoup de dégâts dus au vent avec des rafales estimées à 250 km/h. Pertes humaines importantes sur La Réunion 36 morts ;
- 1964 : Giselle qui a causé des dégâts importants par ravinement, des vents à 180 km/h (Gillot) et une accumulation d'eau de 1 689 mm en 24h (Bélouve) ;
- 1966 : Denise (nuit du 7 au 8 janv.) a engendré des pluies diluviennes sur les hauteurs (1 825mm à Foc-Foc) et des rafales de vents à 180 km/h (Chaudron). Pertes humaines 3 morts.

○ **Analyse des clichés IGN 1966**

Les photos aériennes de 1966 ayant été prises à plus petite échelle que celles des autres années (au 1/50 000), l'identification des modifications morphologiques est rendue difficile. De même, les photos en notre possession ne couvrent qu'une très petite surface de la zone d'étude (partie Sud d'Hell-Bourg et d'Ilet à Vidot). Néanmoins, aucun bouleversement majeur n'est perceptible sur les clichés entre 1961 et 1966 sur ce secteur.

○ **Analyse des clichés IGN 1978**

Secteur d'Hell-Bourg –Mare à Poule d'eau :

Le versant d'Hell-Bourg ne présente pas de niches d'arrachement récentes. Néanmoins, il est entaillé par de nombreux axes de ravinement qui délimitent des masses instables. La plus importante d'entre elles se situe à hauteur du Camp Ozoux (200 m environ à l'ouest du belvédère). Elle forme un triangle de 40 m de base pour 30 m de haut environ ce qui donne un volume mobilisable d'une dizaine de milliers de m³ (en considérant une épaisseur moyenne de 10 m).

Un effondrement semble avoir affecté le versant Ouest du plateau d'Hell-Bourg, en contrebas du cimetière. Une niche d'arrachement est partiellement visible au niveau du tiers supérieur du versant ainsi que des accumulations de matériaux à sa base.

Les principales instabilités affectant le Plateau de Mare à Poule d'eau se situent vers son extrémité Nord-ouest (cf. Figure 11). Deux zones de départ sont visibles : la première affecte une des arrêtes NW-SE et la seconde la bordure du plateau. Les matériaux mobilisés, d'un volume total compris entre 10 et 50 000 m³ ont formé deux cônes d'éboulis jointifs qui sont venus obstruer une partie du lit de la ravine Bras Sec entraînant la disparition d'un méandre.

Enfin, il est également important de noter que le niveau d'eau de la mare est relativement haut en 1978 (cf. **Figure 10**).

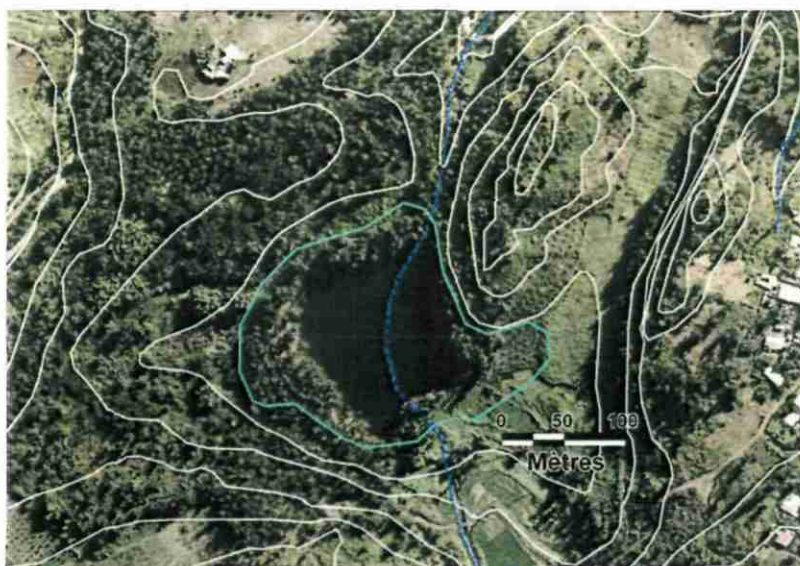


Figure 10 - Comparaison du niveau d'eau de la mare à Poule d'eau entre 1978 (lignes Iso en bleu) et 2003 (lignes Iso en blanc)

Secteur d'Ilet à Vidot :

Entre 1961 et 1978, on note une augmentation de l'urbanisation de la partie Nord du plateau d'Ilet à Vidot.

La zone la plus sensible à l'érosion reste le versant Est de l'îlet. Ponctuellement la bordure du plateau a reculé d'une vingtaine de mètres suite à une érosion régressive en tête de talweg. Les matériaux déstabilisés ont obstrué une bonne partie du lit de la ravine sans pour autant entraîner un phénomène d'embâcle (une partie des matériaux est restée en fond de talweg).

En arrière de la zone concernée, une coulée boueuse s'est propagée depuis la bordure du plateau vers le Bras Marron.

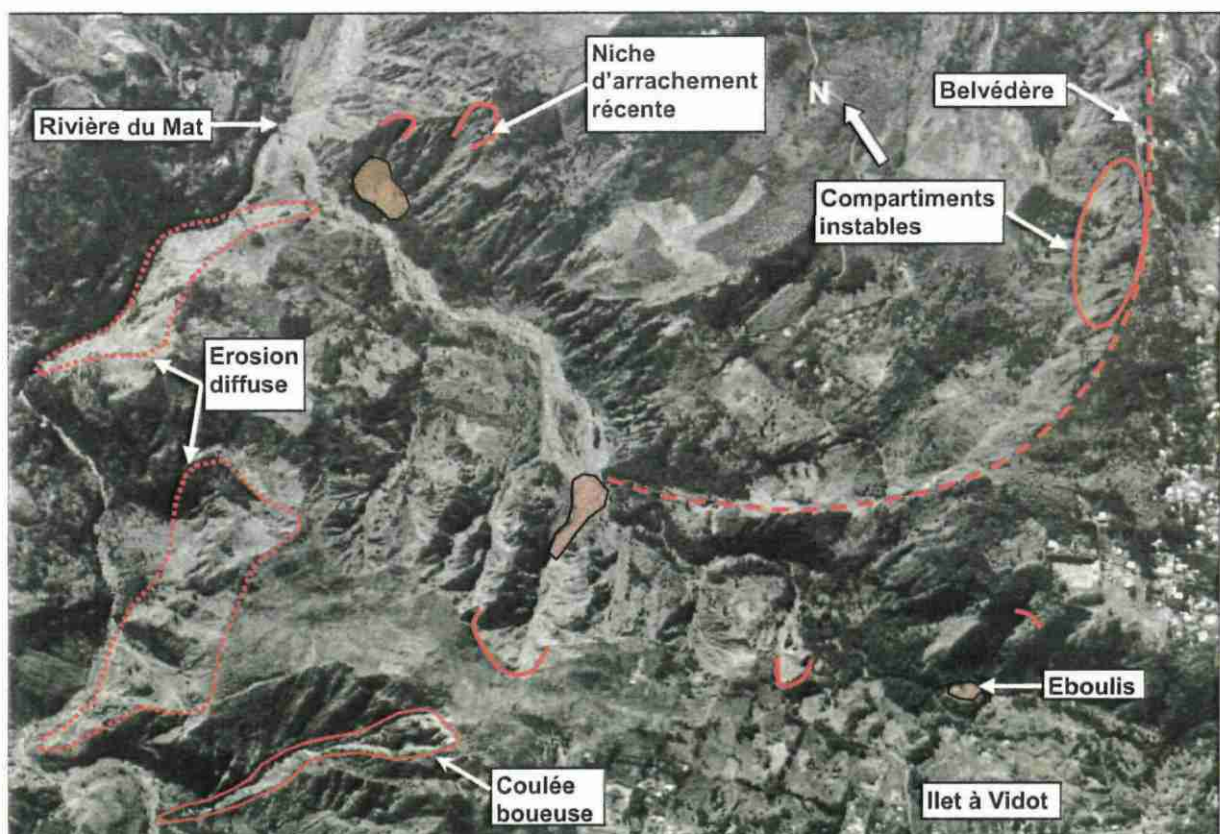


Figure 11 - Principales traces d'instabilités visibles sur le cliché IGN 1978

Entre 1978 et 1984, deux phénomènes cycloniques ont concerné La Réunion :

- 1980 : Hyacinthe (18 au 27 Janv.) dont les dégâts ont été considérables dus à la durée importante des précipitations (5181mm à Foc-Foc). Les vents ont été de faible puissance (137 km/h à Gillot). Pertes humaines importantes sur La Réunion 25 morts.
- 1981 : Florine (7Janv.) des dégâts limités malgré des rafales de vents importantes (234 km/h à la Plaine des Cafres).

La première campagne disponible post-Hyacinthe date de 1984, ce qui laisse un intervalle suffisant pour atténuer les traces des événements de faible à moyen ampleur engendrés par l'épisode cyclonique.

○ **Analyse des clichés IGN 1984 :**

Secteur d'Hell-Bourg –Mare à Poule d'eau :

Trois traces d'effondrement sont visibles dans le versant d'Hell-Bourg (à proximité du belvédère). La plus importante d'entre elles, située vers l'Est, a affecté toute la hauteur du versant. Les matériaux éboulés (Volume > 50 000 m³) ont rempli le fond du sillon qui occupe le pied de versant formant un barrage dans ce secteur.

Le secteur de Mare à Poule d'eau montre de nombreuses traces d'instabilités :

- une nouvelle niche d'arrachement est visible dans le versant Ouest. D'une largeur de 80 m environ, elle a entraîné un recul de la bordure du plateau sur une cinquantaine de mètres.
- les talwegs du versant Nord paraissent plus incisés. Quelques lambeaux de cônes d'éboulis occupent le pied de versant, en partie sapés par les eaux en crue. Le lit de la rivière du Mat présente de nombreuses zones d'atterrissement marquées par une incision plurimétrique de ces dépôts.
- les traces laissées par la coulée de boue engendrée par la vidange de la mare au cours de Hyacinthe sont encore visibles en contrebas de la RD48.

Secteur d'Ilet à Vidot :

L'événement majeur est le recul de plus de 100 m de la bordure Est du plateau au même endroit qu'en 1978. La quantité de matériaux déstabilisés, de plusieurs dizaines de milliers de m³, a entraîné un engravement important du lit de la Ravine Bras Sec.

De même, un autre glissement de terrain ayant affecté une partie du versant Nord-est de l'îlet a entraîné la formation d'un embâcle dans la rivière du Mat. Sur cette portion la rivière circule dans un défilé étroit de 25 m de large. Plusieurs mètres de dépôts en placage sont encore visibles sur la rive opposée ; le volume total de matériaux déstabilisés étant supérieur à 50 000 m³.



Figure 12 - Principales traces d'instabilités visibles sur le cliché IGN 1984 (Post-Hyacinthe)

Entre 1984 et 1997, trois cyclones majeurs ont concerné La Réunion :

- 1987 : Clotilda (13 Fév.) accompagnés de vents à 173 km/h (Gillot) et des précipitations à 1504 mm (Commerson). Des dégâts importants avec des pertes humaines (9morts) ;
- 1989 : Firinga (29 Janv.) vents à 216 km/h (St Pierre), pluies 1309 mm (Gîte de Bellecombe). Les dégâts les plus importants ont été enregistrés dans le Sud qui a été transformé en un vaste torrent de boue (700 mm d'eau en moins de 24h à la Plaine des Cafres). Dégâts humains importants : 3 disparus, 52 blessés, 2 morts ;
- 1993 : Colina (19Janv.) vents à 205 km/h (Plaine des Palmistes), pluies: 894 mm (Mafate), 2 morts, dégâts importants sur les infrastructures et les cultures.

○ **Analyse des clichés IGN 1997**

Secteur d'Hell-Bourg –Mare à Poule d'eau :

Suite aux désordres engendrés par le passage du cyclone Hyacinthe sur les infrastructures routières, une modification du tracé de la RD48 a été réalisée au niveau du belvédère.

Un des trois éboulis ayant affecté le versant d'Hell-Bourg est encore actif (à proximité du belvédère). L'évolution par érosion régressive de la bordure du plateau est la plus marquée dans le secteur Nord-est. Néanmoins on assiste globalement à une revégétalisation des versants.

Secteur d'Ilet à Vidot :

La bordure Est du plateau a reculé de 30 m en partie sommitale du talweg. Hormis cet événement, il n'y a pas de grands bouleversements morphologiques : les versants sont relativement stables avec une tendance à la revégétalisation.

Entre 1997 et 2003, seul le cyclone Dina (22 janv.) concerne l'île accompagné de vents à 180 km/h et des rafales dans les hauts pouvant atteindre 250 km/h.

○ **Analyse des clichés IGN 2003**

Secteur d'Hell-Bourg –Mare à Poule d'eau :

Deux niches d'arrachement d'une dizaine de mètres de large alimentent en blocs deux cônes d'éboulis situés en pied de versant de part et d'autre du belvédère. Une nouvelle niche d'arrachement fait son apparition vers son extrémité Ouest. Elle occupe toute la hauteur du versant sur une largeur de 50 m avec un volume de matériaux éboulés dépassant 10 000 m³.

La bordure du plateau de Mare à poule d'eau recule ponctuellement d'une dizaine de mètres en tête de talwegs.

Secteur d'Ilet à Vidot :

Le secteur le plus instable reste le même qu'au cours des années précédentes. Néanmoins, les effondrements sont de moindre ampleur et correspondent davantage à des phénomènes de réajustement des pentes d'équilibre du talweg.

○ **Synthèse de l'analyse photo-interprétative :**

L'étude des photographies aériennes à différentes époques a permis de mettre en évidence des évolutions morphologiques majeures afin de cibler les secteurs les plus instables.

Le versant d'Hell-Bourg est le siège de nombreux effondrements localisés essentiellement dans le secteur du belvédère. Ces derniers sont de faible à moyenne ampleur avec pour les plus importants d'entre eux des volumes de matériaux déstabilisés de l'ordre de 10 000 m³. Ce versant correspond à l'escarpement principal des glissements emboîtés affectant le plateau de Mare à Poule d'eau.

Constitués de formations bréchiques peu indurées, les versants Nord et Ouest du plateau de Mare à Poule d'eau sont soumis à une érosion diffuse intense. Ces derniers sont sans cesse ravinés par les eaux de ruissellement apportant en continu des matériaux fins à la Rivière du Mat. La Ravine Bras Sec et la Rivière du Mat contribuent au démantèlement des reliefs en sapant le pied des versants au cours des fortes crues.

Dans le secteur d'Ilet à Vidot, les principales instabilités recensées se situent au niveau du versant Est. Ils correspondent à une érosion régressive en tête de talweg à l'origine du recul de la bordure de l'îlet. Ce recul n'est pas continu dans le temps. En effet, on note une phase d'accélération entre 1978 et 1984 ; durée au cours de laquelle la bordure du plateau a reculé d'une centaine de mètres.

La campagne de 1984 a été réalisée quatre ans après les fortes précipitations qui ont concerné l'île pendant 15 jours (passage de Hyacinthe).

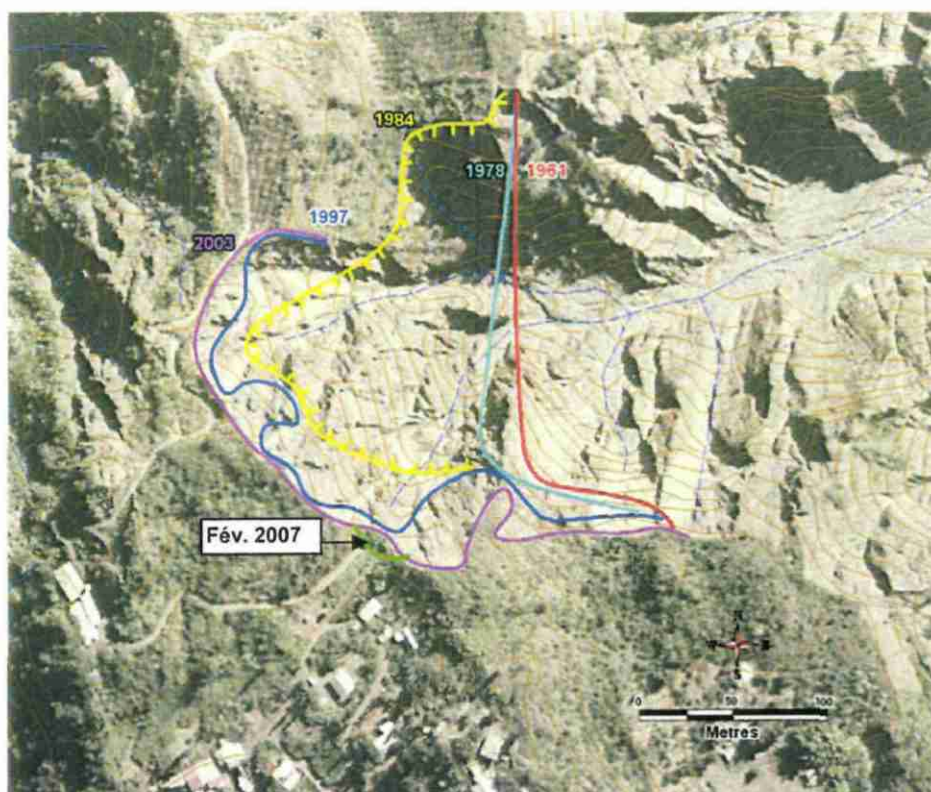


Figure 13 - Evolution du recul de la bordure Est d'Ilet à Vidot entre 1961 et 2003

De même, une partie de la route de l'élevage porcin a été emportée sur une dizaine de mètres suite au passage de Gamède en février 2007.

L'énumération entre chaque campagne des événements climatiques majeurs a permis de mettre en évidence l'impact des conditions climatiques sur la survenance des instabilités. Hyacinthe est l'événement qui a causé le plus de mouvements de terrain dans ce secteur, mais également sur l'ensemble de l'île.

Néanmoins, le recensement des instabilités par le biais des photographies aériennes a ses limites. En effet, seul les événements de moyenne à grande ampleur ont un impact visuel important à petite échelle et peuvent être identifiés sur les photographies aériennes (au 1/25 000 et 1/50 000). Ainsi, il est indispensable d'effectuer des relevés sur le terrain afin d'établir un recensement précis de toutes les désordres non perceptibles sur les photographies aériennes (fissuration du bâti ou des infrastructures routières).

De même, les prises de vue n'ayant pas toujours été réalisées juste après les événements météorologiques majeurs, les traces d'instabilités d'ampleur limitée disparaissent rapidement suite à l'érosion et/ou la revégétalisation du site concerné. C'est pourquoi une enquête auprès de la population ou des services techniques reste nécessaire pour inventorier l'ensemble des phénomènes historiques.

3.1.2 Observations de terrain

Les principaux indices d'activité connus sont reportés sur la Figure 38.

Secteurs Mare à Poule d'eau / Fond de Rond Point :

Le secteur compris entre au Nord le pont de la ravine drainant la mare à Poule d'Eau et l'entrée du village éponyme, est l'objet d'importants désordres, affectant en premier lieu la RD48. Le tracé de celle-ci emprunte un couloir d'« avalanche boueuse » liée notamment aux effondrements des remparts bordant les plateaux d'Hell-Bourg et de Mare à Poule d'Eau. La route a ainsi été reconstruite suite à une coulée de boue survenue à l'occasion du passage de Hyacinthe (cf. plus en avant).

La route départementale chemine sur un versant (secteur dit « les tournants Bambous ») dont les mouvements sont importants. La chaussée, les ouvrages de soutènement et les parapets en béton sont affectés de nombreuses fissures de direction générale N10°, avec rejeux importants (cf. **Figure 14** et **Figure 15**). Ces désordres nécessitent les travaux importants et réguliers de reprise de la chaussée. Les témoignages recueillis (riverains, services techniques, Direction des Routes du Conseil Général) s'accordent pour dire que les mouvements, bien que de moindre ampleur, se poursuivent y compris hors saison des pluies. Le réseau de fissures est globalement parallèle à la ligne de plus grande pente, et s'aligne sur la direction d'une faille majeure se prolongeant depuis le Kiosque des Demoiselles jusqu'au versant rive gauche de la Rivière du Mât.

Les désordres observables sur la RD48 se poursuivent jusqu'à l'entrée du village de Mare à Poule d'eau, dans l'alignement de la bordure du plateau. Sur le plateau proprement dit, aucun indice d'activité significatif n'est recensé, à l'exception notable cependant de sa bordure Ouest. Le secteur de l'ancienne école de Mare à Poule d'Eau et du lotissement des

Bambous connaît en effet une activité relativement importante. Ainsi en octobre 2001, des désordres apparaissaient sur la chaussée du lotissement et sur certaines constructions (qui pour certaines - construites en 1995 - connaissaient une fissuration depuis 1998/99). Les désordres les plus significatifs étaient concentrés sur une bande d'une trentaine de mètres de large, courant sur plus de 300 m de longueur. Cette zone de fortes déformations s'aligne sur la niche d'arrachement du glissement (direction sensiblement SW-NE) apparue le 03 octobre 2001 et correspondant à la bordure orientale de la couronne du glissement d'Hell-Bourg (cf. **Figure 16** à **Figure 18**).



Figure 14 : Bombement de la RD48 au front du glissement (cliché pris au droit de l'ouvrage de franchissement de la ravine drainant la mare à Poule d'Eau – point coté IGN 533 m)



Figure 15 : Réseau de fissures décrochantes affectant la RD48 – Secteur dit des « tournants bambous »

On notera qu'une mare sèche a été identifiée (rapport BRGM 89REU12, juin 1999) dans la partie sud du lotissement, à moins d'une centaine de mètres de la bordure de plateau (hauteur d'eau maximale proche de 1 m).

Une bande de terrain de 200 m en arrière de l'escarpement surplombant la mare à Poule d'Eau, et intéressant l'essentiel de l'emprise du lotissement des Bambous, est ainsi concernée par un phénomène de glissement-tassement.

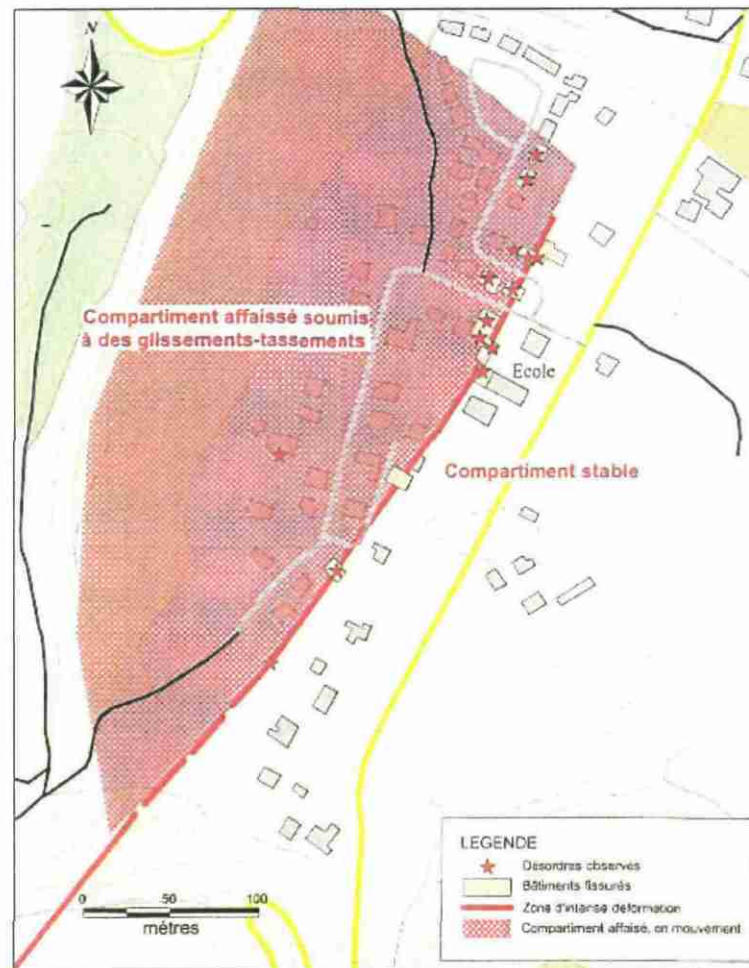


Figure 16 : Lotissement des Bambous (partie sud-ouest de Mare à Poule d'eau) - localisation des désordres observés fin 2003 et délimitation de la zone active (extrait rapport BRGM/RP-51105-FR)



Figure 17 : Fissure active dans l'emprise de l'ancienne école de Mare à Poule d'Eau



Figure 18 : Fissure active dans le lotissement des Bambous

Fond de Rond Point correspond au secteur, à vocation essentiellement agricole, situé en contrebas des plateaux de Mare à Poule d'Eau et d'Hell-Bourg. Cette zone est caractérisée par l'existence d'une dépression – la mare à Poule d'Eau (qui a été pour partie comblée par la coulée boueuse survenue lors de Hyacinthe, cf. plus en avant) – et de plusieurs escarpements d'orientation pseudo-parallèle à celle des remparts d'Hell-Bourg/Mare à

Poule d'Eau. Les indices d'activité y sont nombreux, le suivi géodésique confirmant (cf. paragraphe 3.2) qu'il s'agit d'une des zones du glissement les plus actives.

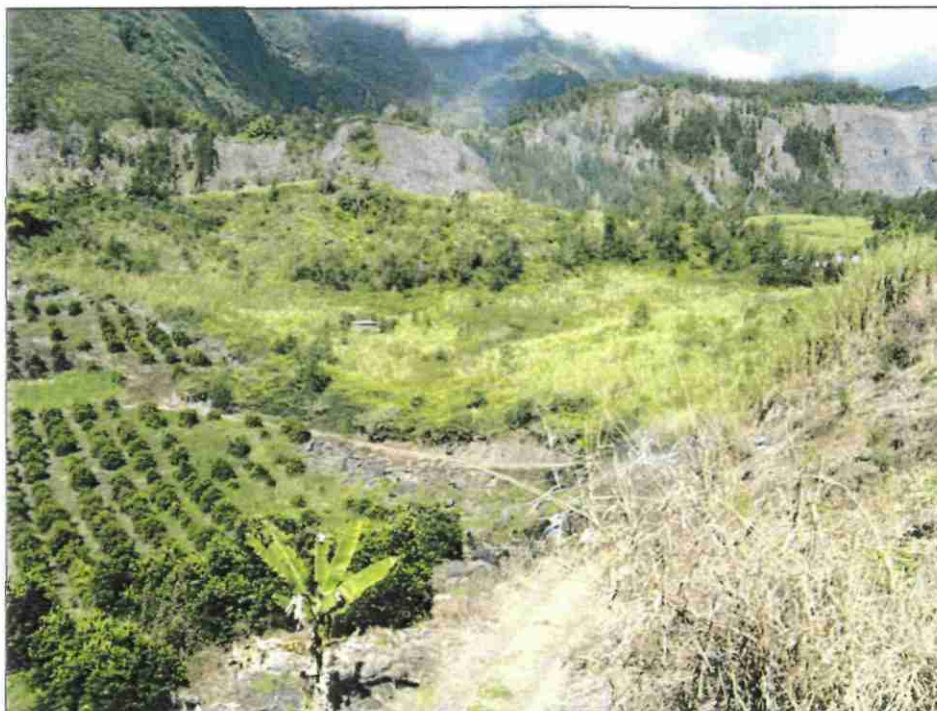


Figure 19 : vue partielle du secteur de Fond de Rond Point - en arrière plan l'escarpement du plateau d'Hell-Bourg



Figure 20 : Faille active avec rejeux ? plurimétriques

Secteur Hell-Bourg :

Le rempart en limite nord du plateau d'Hell-Bourg, depuis la Ravine Bras Sec à l'Ouest jusqu'au plateau de Mare à Poule d'eau à l'Est, est le siège de fréquents glissements de terrain et coulées de boue d'ampleur variable, et d'un ravinement intense ; chaque épisode pluvieux d'importance donnant naissance à des mouvements de terrain plus ou moins importants en un lieu ou un autre du rempart. Ce fut le cas pour Clothilda (février 1987), avec un glissement de terrain mobilisant un volume d'environ 20 000 m³ (rapport BRGM 87REU36, mars 1988) et amenant le kiosque du Belvédère à moitié dans le vide et l'ancien CD48 en bordure du rempart.

Mais Hyacinthe en janvier 1981 provoqua le phénomène le plus remarquable. Le 14 janvier, en réponse aux fortes précipitations survenues les jours précédents, deux grands arrachements se produisent dans l'escarpement de part et d'autre du kiosque. Une coulée de boue de plusieurs milliers de m³ « déboule » en longeant le pied de rempart sur environ 1 km avant de se déverser dans la mare à Poule d'Eau et de provoquer sa vidange brutale (cf. **Figure 21**). Le phénomène entraîne la rupture du verrou rocheux situé à l'aval de la mare et provoque un nouveau déboulé se propageant jusqu'à la Rivière du Mât, emportant plusieurs cases et la RD48.

Ce secteur du rempart avait connu, précédemment encore à Hyacinthe, d'autres instabilités importantes, entraînant notamment la ruine de l'ancien tracé de la route d'Hell-Bourg qui passait à Fond de Rond Point et qui franchissait ensuite à l'escarpement en contrebas du kiosque du Belvédère.

Des fissures de décompression (ouverture et rejeux pluridécimétriques) sont observables au niveau du secteur du kiosque jusqu'à une trentaine de mètres environ en arrière de la bordure de rempart (cf. **Figure 24**).

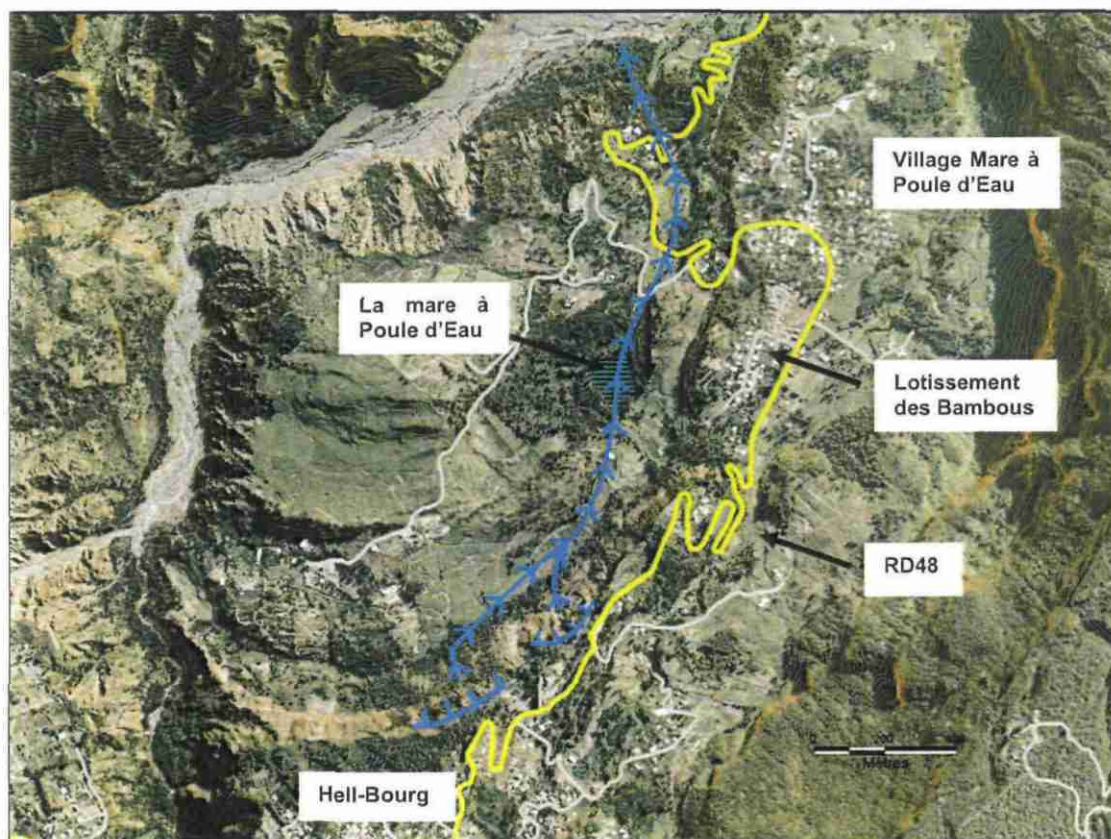


Figure 21 : Zones de départ et axe de propagation de la coulée boueuse de la mare à Poule d'Eau
(janvier 1980)



Figure 22 : Escarpement d'Hell-Bourg

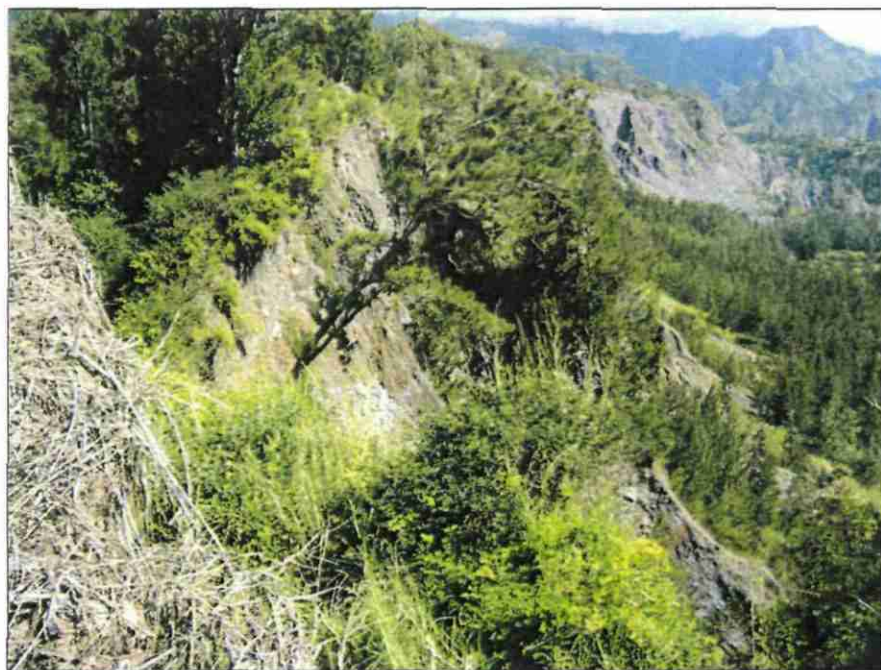


Figure 23 : Zone de départ au niveau du kiosque du glissement-coulée de 1980



Figure 24 : Fissures de décompression en arrière de l'escarpement d'Hell-Bourg - secteur du kiosque

Le versant rive droite de la Ravine Bras Sec (bordure occidentale du plateau d'Hell-Bourg) se caractérise également par une grande fragilité. De nombreux arrachements et glissements de terrain, décamétriques à hectométriques, et des phénomènes érosifs marqués s'y développent. Les investigations soulignent la permanente évolution de ces pentes. On notera qu'une mare sèche (quelques centaines de m²) est présente vers le cimetière, à faible distance de la bordure de versant.

Secteur Ilet à Vidot :

Le versant rive gauche de la Ravine Bras Sec, qui marque la bordure orientale d'Ilet à Vidot, et présente assez largement une configuration en « bad-land » (cf. **Figure 25**), génère de nombreuses instabilités (glissements, éboulements, ravinement). La mise à nu des terrains est quasi-constante.



Figure 25 : Partie Nord d'Ilet à Vidot et versant rive gauche de la ravine Bras Sec

Pendant Hyacinthe en 1980, un glissement s'est déclaré dans la partie Nord de l'îlet, sur le versant Bras Sec. Créant une entaille avançant profondément à l'intérieur du plateau, il a favorisé le développement latéral des phénomènes érosifs, entraînant un recul de la bordure de l'îlet. Le glissement se serait déclaré à proximité d'une mare sèche (rapport BRGM 89REU12, juin 1989).

D'autres mares sèches sont repérées sur le plateau. De dimensions relativement réduites et ne pouvant stocker que des hauteurs d'eau relativement limitées (de l'ordre de 1 m), elles se situent à l'intérieur du plateau (des indices de tassement peuvent alors être observés en périphérie) ou à distance réduite des remparts (elles jouent alors un rôle prépondérant dans le processus de recul des têtes de versant).

Les photographies pages suivantes permettent de visualiser un certain nombre de cicatrices ou d'indices d'activité observés lors d'une visite de terrain réalisée en octobre 2007. La **Figure 26** permet leur localisation.



Figure 26 : Localisation des cicatrices et indices d'activité d'Ilet à Vidot illustrés sur les figures qui suivent



Figure 27 : Point 1 – Fissuration de la chaussée au début du Chemin Manouilh (après Gamède).



Début d'ouverture du bas-côté avec composante
cisailante dextre (fissuration en échelon)



Figure 28 : Point 2 – fracture ouverte N160°
avec cisaillement dextre (apparition 2-3
ans) Chemin Manouilh



Figure 29 : Point 3 – Faille normale ancienne N140°. Chemin Manouilh

Réfection de la chaussée chaque année.
(affaissement pluricentimétriques).



Figure 30 : Point 4 – Continuité vers l'Ouest de la faille visible sur la figure 3, au niveau du Chemin Manouilh



Figure 31 : Point 5 - Continuité vers l'Est de la faille visible sur la figure 3
(construction en surplomb de la route d'Hell-Bourg RD 48)



Figure 32 : Point 6 – Fissuration de la RD 48 descendant vers le Bras Fontaine
(direction N160°)



Figure 33 : Point 7 – Faille normale direction N140°



Figure 34 : Point 9 – Niche d'arrachement métrique en bordure nord de l'îlet (cliché gauche). Fissure ouverte direction N/S (en partie remblayée) dû à la décompression du versant en direction du Bras Fontaine (cliché à droite)



Figure 35 : point 10 – Recul d'une dizaine de mètres de la bordure Est de l'îlet suite à Gamède. Une partie du chemin menant à un élevage porcin a été emportée.



Figure 36 : Point 10 – Vue en direction du secteur Fond de Rond Point depuis le point 10

3.2 Suivi des bornes géodésiques MVTerre

Le rapport BRGM/RP-56699-FR, dont les principaux éléments ci-dessous sont extraits, détaille la méthodologie mise en œuvre pour le suivi géodésique du glissement et sur l'analyse des données d'acquisition.

Le glissement de terrain d'Hell-Bourg a fait l'objet en 2003, dans le cadre du programme MVTerre, de la mise en place d'un réseau géodésique constitué de 25 bornes (bornes en béton et repères en laiton - spit - scellés dans un bloc rocheux ou dans une structure en béton). Ce réseau a fait l'objet de trois sessions de mesures « globales » :

- 1^{ère} campagne d'août à décembre 2003 ;
- 2^{ème} campagne de mai à juin 2004 ;
- 3^{ème} campagne de septembre à octobre 2007.

Les bornes SA013 et SA014 n'ont pu être relevées (bornes SA013 enlevée pour réalisation d'un parking et SA014 existante mais non accessible). La **Figure 37** à la **Figure 38** présentent la localisation des bornes, ainsi que les déplacements enregistrés au cours de la période 2003/2007 (le tableau des écarts mesurés est donné en annexe 1).

On retiendra du suivi géodésique effectué les principaux éléments suivants :

- Les mesures soulignent l'existence d'un **mouvement d'ensemble orienté selon une direction générale vers le Nord**.

Sur la bordure Nord du plateau d'Hell-Bourg, les mouvements montrent une composante ouest plus ou moins marquée, le gisement mis en évidence sur les stations SA015 et SA017 étant respectivement N303° et N352°. Cela pourrait s'expliquer par la proximité des bornes avec la bordure de plateau, entraînant un phénomène « d'appel au vide ». Ainsi sur la station SA015, la direction N303° est approximativement perpendiculaire à l'orientation du rebord de plateau.

Sur l'Ilet à Vidot, les directions de déplacement varient entre N22° (SA023) et N333° (SA024). Ces variations semblent là également s'expliquer par le contexte topographique propre à chaque station, induisant des mouvements « secondaires » (vraisemblablement plus ou moins superficiels) qui ne remettent pas en question la direction générale du glissement.

- **La bordure Nord-ouest de Mare à Poule d'Eau ainsi que le secteur de Fond de Rond Point sont les zones sur lesquelles l'activité est la plus importante**, avec des vitesses moyennes de déplacements planimétriques comprises entre près de 1 m/an et 1,70 m/an (maximum atteint pour la station SA004). Ces secteurs sont au contact de la Rivière du Mât, soulignant par là-même l'influence vraisemblable du cours d'eau dans le mécanisme de glissement. Les bornes SA003 à SA008 mettent ainsi en évidence une décroissance des mouvements vers l'arrière - vers le Sud - du glissement ;

- **Le village d'Hell-Bourg n'est pas directement concerné par le glissement**, les stations SA016 et SA018 ne révélant pas de déplacements significatifs (vitesses planimétriques moyennes limitées à 1,5 cm/an). Seule la bordure Nord du plateau (camp Ozoux, Belvédère) montre des déplacements relativement importants, avec des déplacements planimétriques moyens de l'ordre de 12 cm/an et de direction Nord à Nord-Ouest (stations SA015 et SA017, implantées à environ 50 à 70 m de la rupture de pente).

De la même façon, **seule la bordure Nord-est du plateau de Mare à Poule d'Eau apparaît affectée par le glissement**. Les bornes SA010 à SA012 montrent en effet des valeurs de déplacement très modestes (1,5 à 2 cm/an), comparables à celles enregistrées sur le village d'Hell-Bourg et ne témoignant pas de mouvements avérés. Il est par ailleurs à noter que la station SA013, située au droit du lotissement des Bambous (partie sud de Mare à Poule d'Eau), n'est plus opérationnelle et qu'aucune valeur significative de déplacement n'est disponible. On soulignera cependant que ce secteur est connu pour être sujet à une activité relativement importante (cf. paragraphe 3.1.2).

- **Sur l'ilet à Vidot**, les bornes SA019 à SA024 et IGN2107 semblent s'accorder pour témoigner d'un mouvement orienté entre N9° et N24° (seule la borne SA024 à l'extrémité septentrionale de l'ilet montre un azimuth N333°), avec des vitesses de déplacement augmentant vers le Nord, passant de 4 cm/an environ à près de 20 cm/an. Les prochaines mesures réalisées notamment sur la station SA108 (implantées en 2007 – cf. ci-après) permettront de préciser l'emprise du glissement dans la partie Sud d'ilet à Vidot.
- **Les mesures en altimétrie** mettent en évidence, pour l'ensemble de la zone en mouvement, un phénomène de tassement généralisé, avec sur la période d'observation des valeurs minimales de l'ordre de 0,07 m (station SA001 située à l'extrémité Nord et quasiment « en pied » du glissement) et des valeurs maximales proches de 2,50 m (station SA004). Dans la zone la plus active au regard des valeurs en planimétrie (partie nord-est du plateau de Mare à Poule d'Eau et Fond de Rond Point), et en excluant la borne SA001, les valeurs de tassement sont comprises entre -0,90 m et -2,50 m environ. Le rapport entre les écarts planimétriques et altimétriques s'inscrit ainsi dans une fourchette comprise entre 3,7 et 4,3.

Sur les stations SA015 et SA017 situées en bordure du plateau d'Hell-Bourg, ce rapport entre écarts planimétriques et altimétriques est de l'ordre de 1 (0,60 m de tassement pour environ 0,50 m de déplacement horizontal).

Sur l'ilet à Vidot, exception faite de la station SA024 placée à l'extrémité septentrionale du glissement, l'ampleur des tassements décroît vers le Sud, passant de près de 1,60 m environ sur la station SA023 (pour un écart en planimétrie de 0,70 m) à environ 0,25 m pour les bornes SA019 et SA020.

Ce réseau géodésique installé courant 2003 a été complété :

- par la pose en octobre 2007 de trois nouvelles bornes - SA106, SA108 et SA109 – sur le secteur d'Ilet à Vidot. Le « point-zéro » a été effectué le 28/11/07. Trois sessions de mesure ont été menées : le 09/01/08, le 20/02/08 et du 17 mars au 01 avril 2008 ;
- par la pose en août 2007 de la station SAHB à proximité de la station GPS permanente (dans le but notamment d'en vérifier la cohérence des résultats - cf. paragraphe 3.3). Le « point-zéro » a été réalisé lors de la campagne générale de septembre à octobre 2007. Des sessions de mesure ont été menées le 11/10/07, le 28/11/07, le 09/01/08, le 20/02/08 et du 17 mars au 01 avril 2008.

Le tableau ci-dessous présente les écarts observés sur ces bornes implantées en 2007, entre les campagnes de novembre 2007 (septembre 2007 pour SAHB) et de mars 2008.

POINTS	TYPE DE POINT	ECART XY (cm)	ECART Z (cm)	GISEMENT (°)
SAHB	Spit	94,9	-14,0	359°4
SA106	borne MVTerre	3,8	2,6	359°5
SA108	borne MVTerre	1,4	1,8	345°4
SA109	borne MVTerre	6,1	-10,9	31°1

Tableau 3 : Ecart enregistré entre novembre 2007 et février 2008 sur les stations MVTerre implantées en 2007

Alors que les valeurs de la station SA108 apparaissent peu significatives, les écarts observés sur la station SA106 deviennent importants, avec un déplacement planimétrique proche de 4 cm, soit une moyenne de 8 cm/an proche de celle enregistrée sur la borne voisine SA025 (le déplacement étant également orienté au Nord).

Les déplacements enregistrés sur la station SA109 sont considérés comme douteux par le géomètre en raison de difficultés rencontrées pour le relevé du point. Les tendances devront être analysées à la lumière des prochaines campagnes de levés.

Concernant le point SAHB, les mesures indiquent un déplacement planimétrique proche de 1 m en 6 mois environ, associé à un tassement de 14 cm. Entre les mesures effectuées le 9 janvier et le 20 février 2008, l'écart constaté en planimétrie a été de 0,35 m, soit une vitesse de déplacement moyenne sur cette période proche de 1 cm/jour. On notera qu'entre le 20 décembre 2007 et le 20 février 2008, il est tombé environ 2140 mm d'eau sur le poste pluviométrique de Salazie Village, et 1770 mm sur le poste d'Ilet à Vidot. Le vecteur déplacement observé est orienté sensiblement plein Nord, s'inscrivant ainsi dans l'axe de mouvement général déterminé sur le reste du réseau.

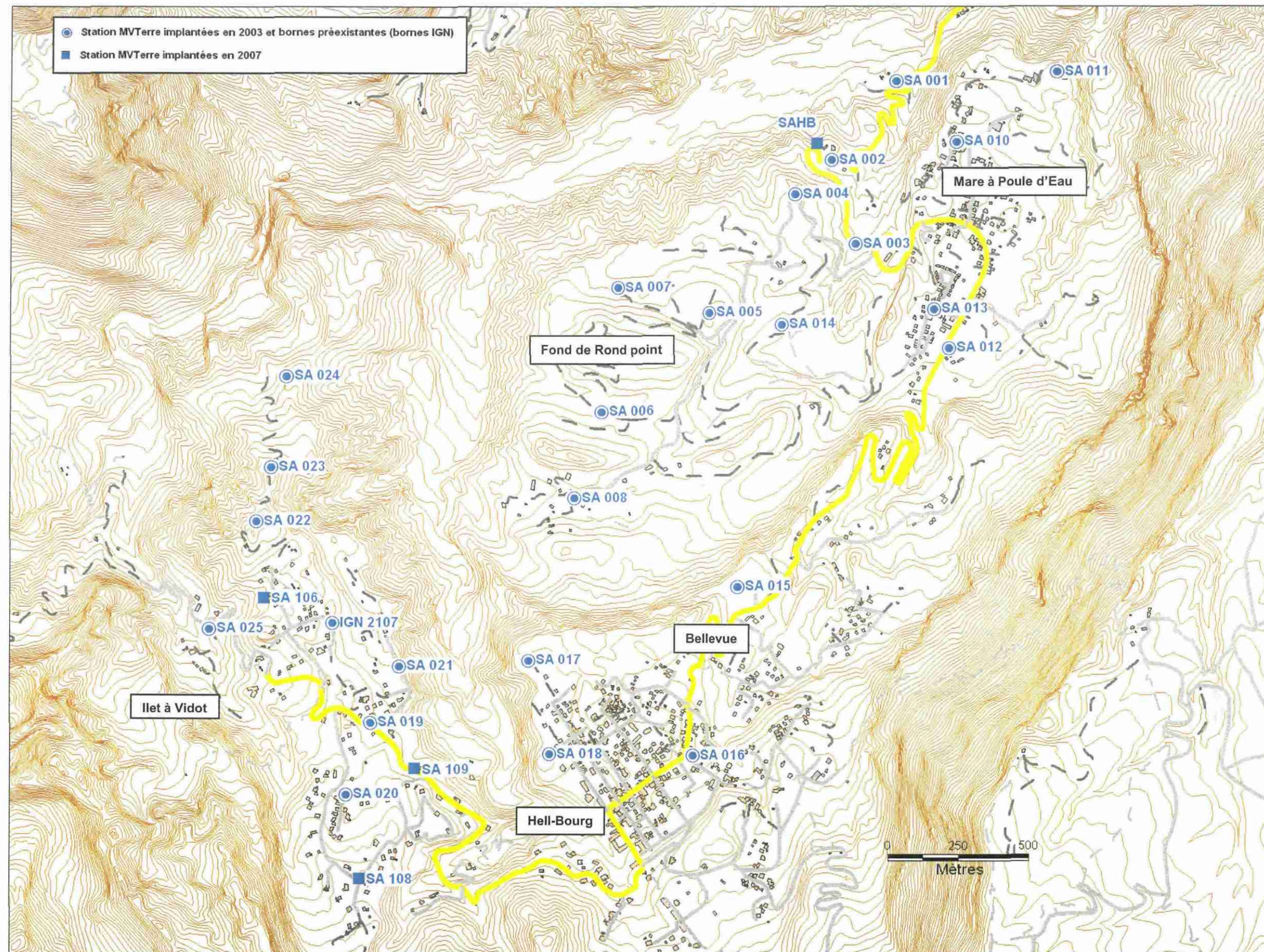


Figure 37 : Localisation des bornes du réseau géodésique MVTerre d'Hell-Bourg/Mare à Poule d'Eau

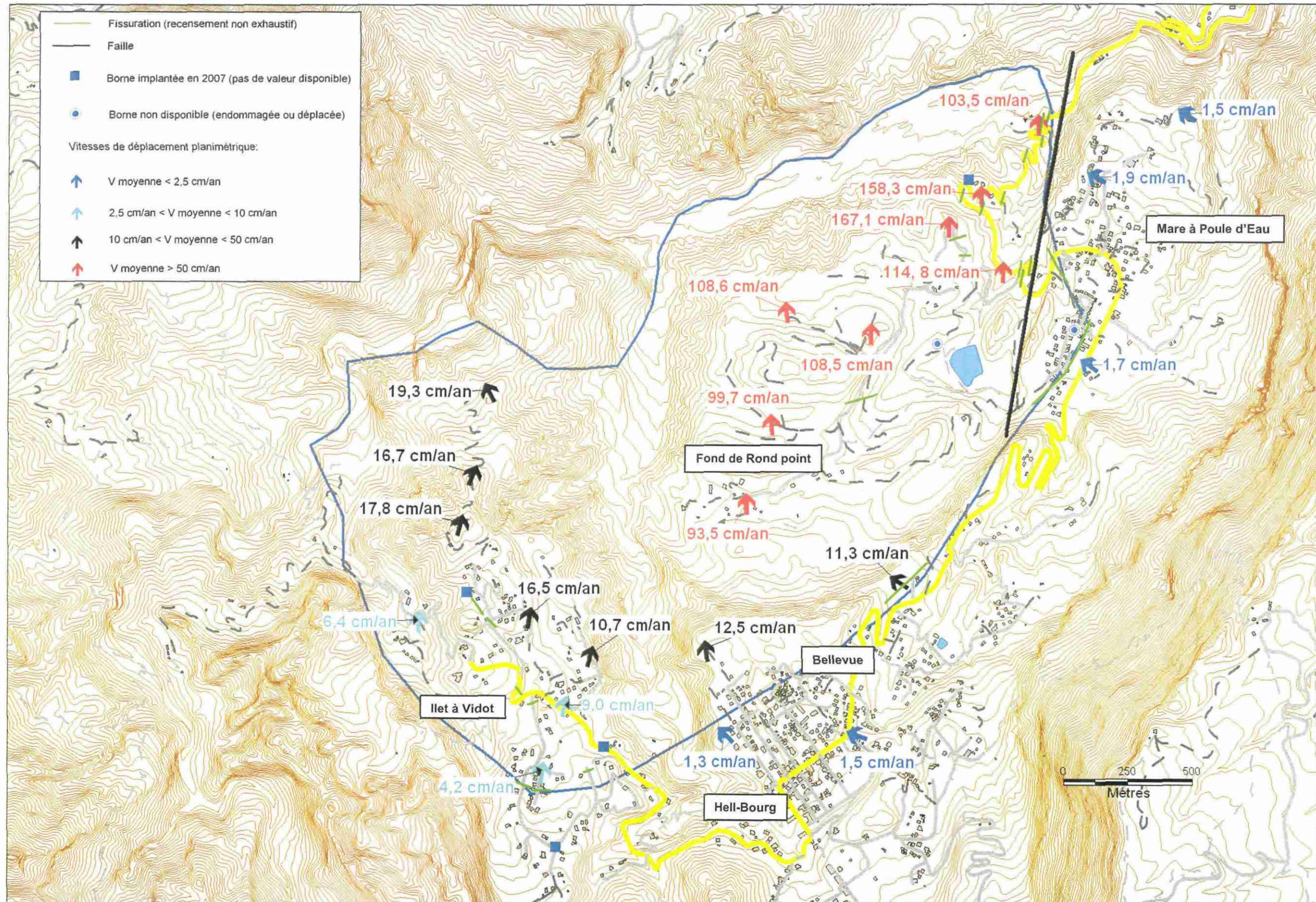


Figure 38 : Déplacements annuels moyens (planimétriques) relevés sur la période 2003/2007 et représentation de la direction du mouvement

Comparaison avec les données GPS antérieures au suivi MVTerre :

Il est possible d'effectuer un comparatif des données de positionnement MVTerre (période 2003/2007) avec les données issues du suivi de la RD48 réalisé à l'initiative du Service des Routes du Conseil Général de La Réunion.

Le réseau de la RD48, dont le suivi a débuté en décembre 1995, concernait 18 stations réparties sur le tracé entre le pont de la Savane et le village d'Hell-Bourg. Le dispositif a été complété en mai 1998 par l'implantation de deux nouvelles stations sur le plateau de Mare à Poule d'Eau. L'identification des bornes suivies est donnée ci-dessous.

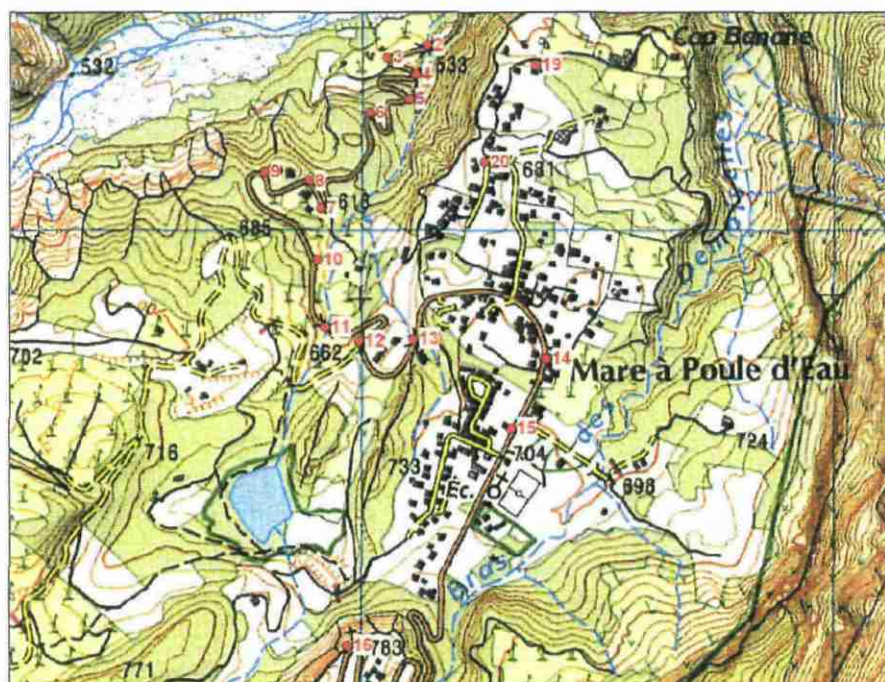


Figure 39 : Réseau observé dans le cadre du suivi des déformations de la RD48

Les résultats de ce suivi sont globalement cohérents avec ceux obtenus dans le cadre du programme MVTerre (cf. **Figure 40**). On retiendra synthétiquement les principaux points suivants :

- le suivi réalisé dès 1995 soulignait l'existence d'un mouvement de grande ampleur, actif, se déplaçant vers le Nord (direction Rivière du Mât). Les gisements mesurés sont identiques à ceux mis en évidence sur les bornes MVTerre ;
- L'importance de l'activité dans la partie Nord-ouest de Mare à Poule d'Eau était déjà mise en évidence, avec des déplacements sur les bornes 3 à 12 de l'ordre de 0,50 m/an. Il est à souligner que les bornes MVTerre SA001, SA002 et SA003, implantées dans le même secteur, révèlent sur la période 2003/07 une accélération sensible des mouvements, avec des déplacements planimétriques annuels compris entre 1 m et environ 1,50 m en moyenne ;
- Les bornes situées sur le plateau de Mare à Poule d'eau (14, 15, 19 et 20), à distance plus ou moins grande de sa bordure Ouest, montraient des déplacements moyens très faibles (entre 0,2 et 0,6 cm/an), soulignant ainsi une relative stabilité.

Les bornes MVTerre SA010, SA011 et SA012 confirment cette analyse, mais on notera que les écarts mesurés sur la période 2003/07, bien que restant peu significatifs, sont plus importants et homogènes entre eux (entre 1,5 cm/an et 2 cm/an, avec une direction de déplacement orientée au Nord-Ouest).

L'accélération des déplacements enregistrés sur la période 2003/07 par rapport à la période précédente s'explique par une pluviométrie globalement plus conséquente (nombre d'épisodes « majeurs » plus importants – cf. Rapport BRGM/ RP-56699-FR).

La figure ci-dessous regroupe les données du suivi RD48 et celles issues du réseau MVTerre.

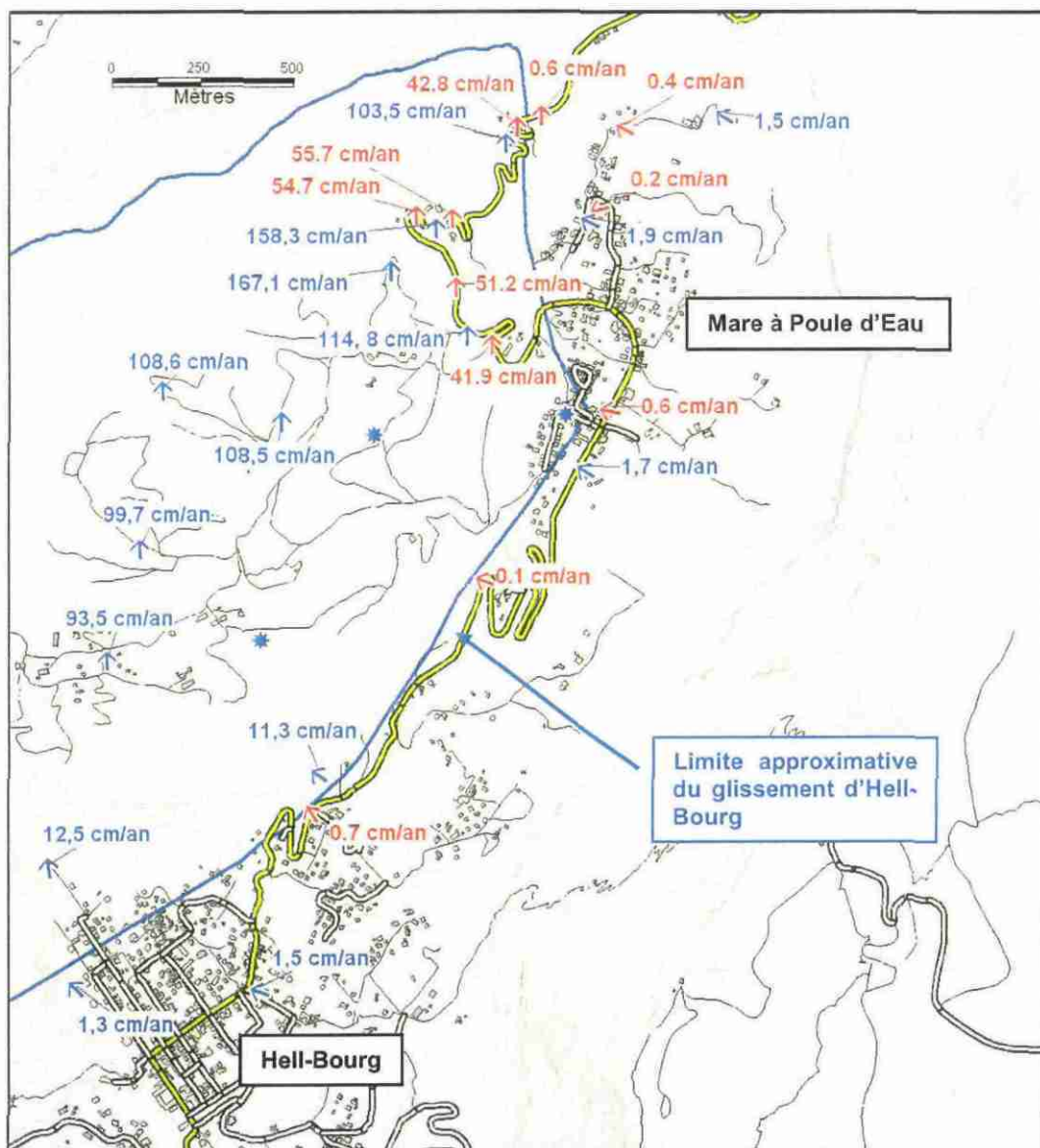


Figure 40 : Comparatif entre les résultats (vitesses moyennes et gisement) du suivi RD48 (en rouge - période 1995/2001) et ceux du suivi MVTerre (en bleu - période 2003/07)

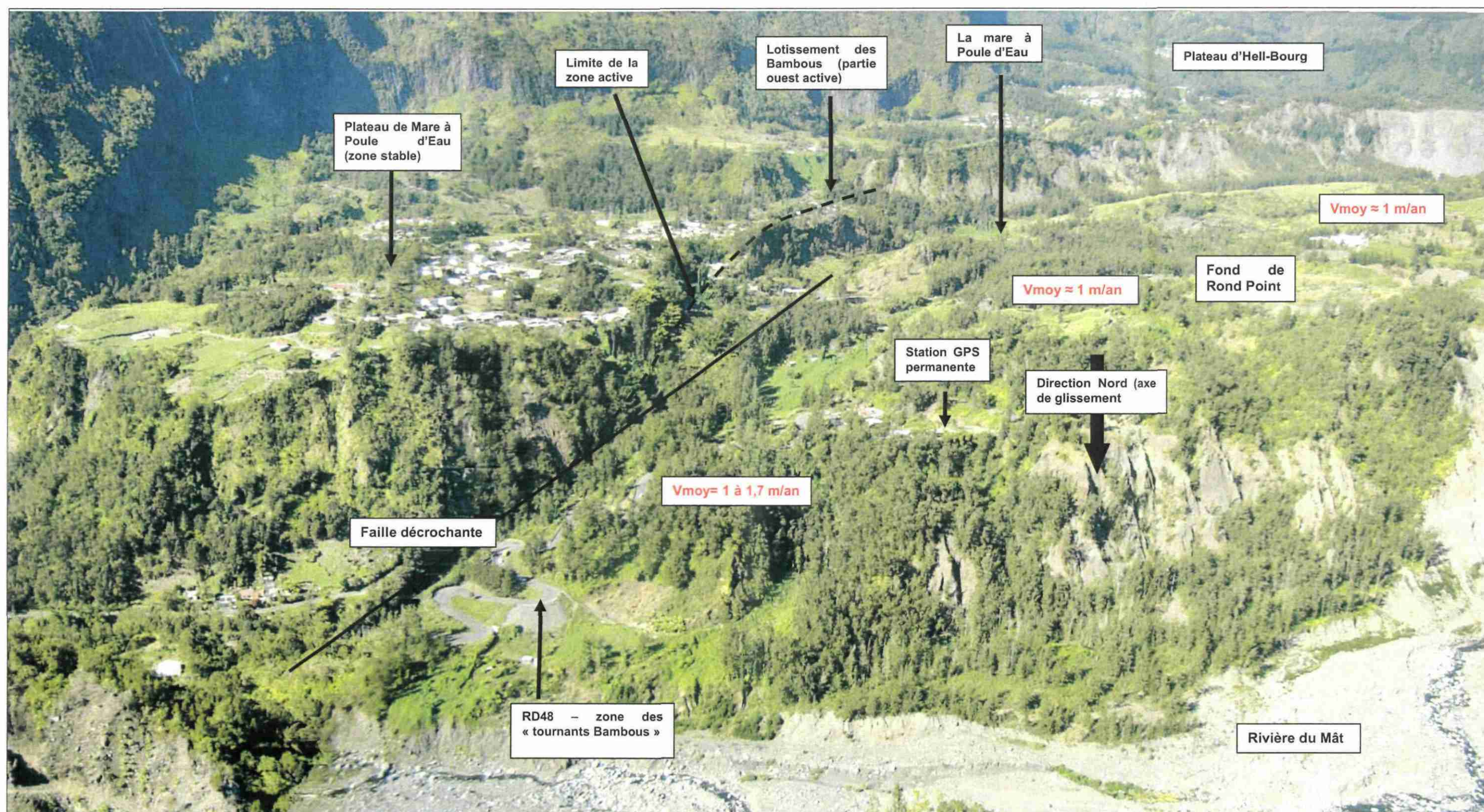


Figure 41 : Vue générale partie septentrionale de la zone en mouvement

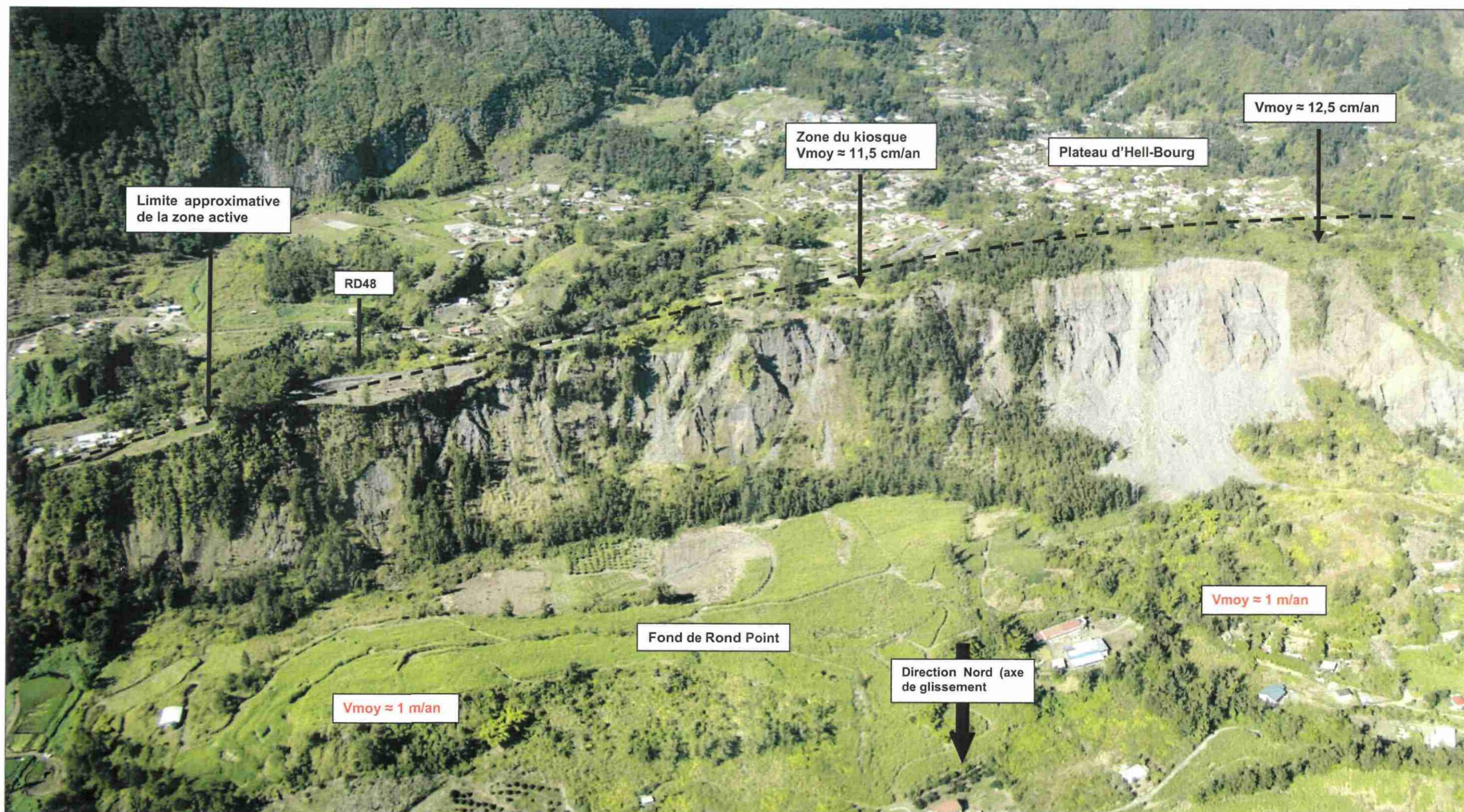


Figure 42 : Vue générale du plateau d'Hell-Bourg et partie sud de Fond de Rond Point.

3.3 Station GPS permanente

Les éléments ci-dessous sont extraits du rapport BRGM/RP-56708-FR, qui présente - en détail le dispositif en place ainsi que la procédure de traitement des données d'acquisition.

Le glissement d'Hell-Bourg a par ailleurs été instrumenté fin 2003 par la mise en place d'une station GPS permanente, de façon notamment à pouvoir suivre l'évolution journalière des déplacements. Le dispositif a été implanté dans la partie Nord de la zone en mouvement, en bordure Nord-est de Mare à Poule d'Eau (cf. **Figure 43**). La station de référence est située à Mare à Vieille Place (à 3 km au Nord-Ouest à vol d'oiseau). Sont donnés ci-après les résultats « bruts » des déplacements enregistrés sur la période fin2003/mi-2008. L'exploitation combinée de ces résultats et des données pluviométriques enregistrées par le poste d'acquisition automatique mis en place fin 2003 sur Ilet à Vidot est présentée au paragraphe 4.1.

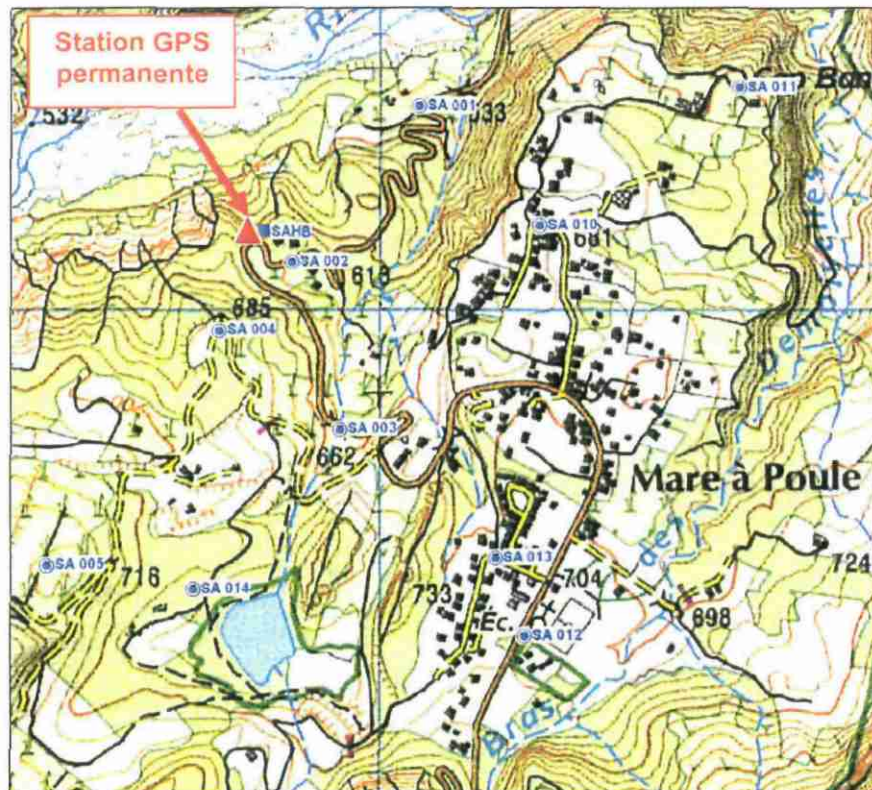


Figure 43 : Localisation station GPS permanente (et bornes géodésiques MVTerre)

3.3.1 Déplacements planimétriques

La **Figure 44** à la **Figure 46** soulignent clairement l'orientation plein Nord du mouvement (même si une légère dérive vers l'Ouest - 1° environ - a été observée au cours de la période d'enregistrement), ce qui est conforme au gisement mis en évidence par le suivi géodésique des bornes MVTerre (et du réseau de la RD48) situées dans la partie nord du plateau de Mare à Poule d'Eau et dans le secteur de Fond de Rond Point. La borne MVTerre SAHB, implantée à proximité immédiate de la station GPS permanente, indique ainsi un gisement N359°4 (cf. tableau n°3).

Sur la totalité de la période d'observation (fin 2003 - mi-2008), la station a enregistré un déplacement horizontal (selon Y) proche de 7,90 m, soit un déplacement horizontal moyen sur la période d'observation de 182 cm/an (environ 15 cm/mois en moyenne). Ces valeurs sont là encore conformes aux vitesses de déplacements mesurées à partir des bornes MVTerre, la station SA002 ayant mis en évidence une vitesse moyenne de déplacement proche de 160 cm/an (ce chiffre n'intégrant pas la saison humide 2007/08, le dernier relevé de la borne ayant eu lieu fin 2007). La dérive en X (direction Est) de la station GPS permanente est inférieure à une vingtaine de centimètres.

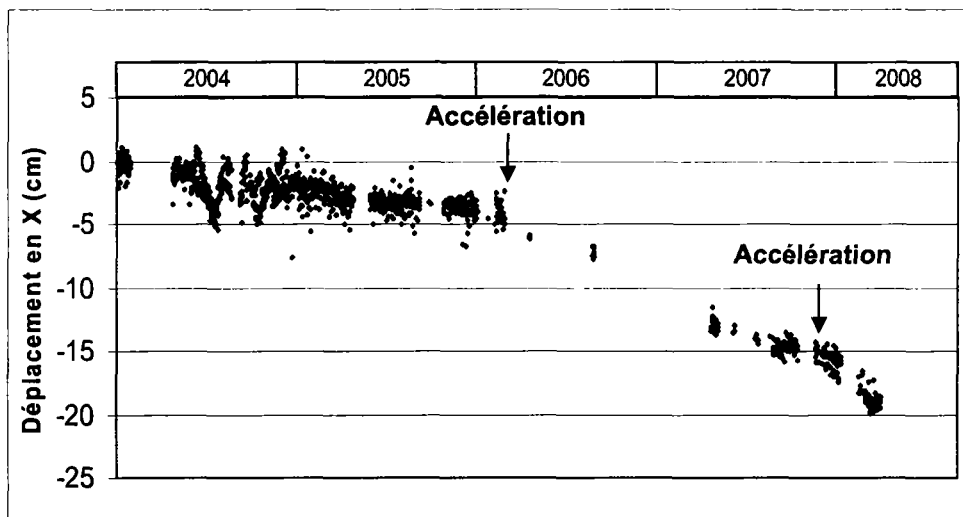


Figure 44 : Station GPS permanente d'Hell-Bourg – déplacements en X

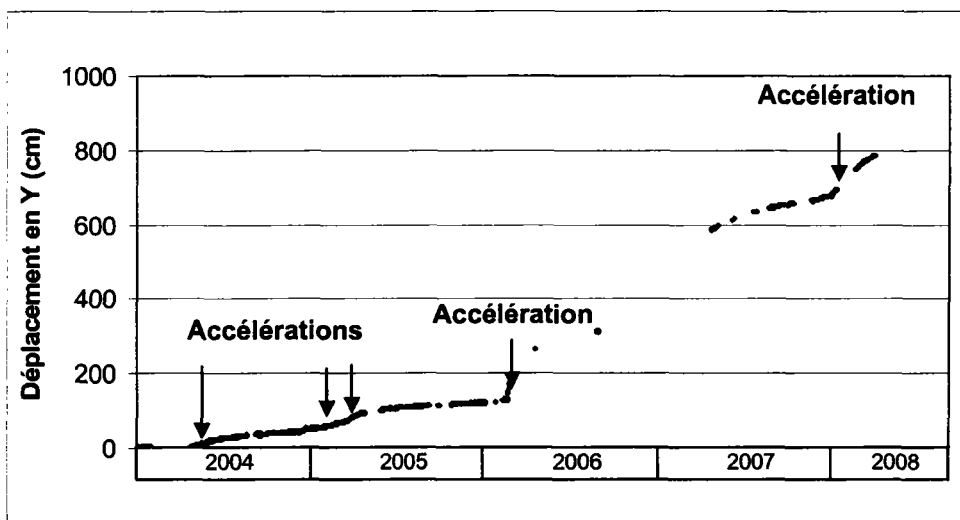


Figure 45 : Station GPS permanente d'Hell-Bourg – déplacements en Y

En ne considérant pour chaque année (à l'exception de 2004 et 2007 du fait de l'absence de données liée à des défauts d'enregistrement de la station), que la période courant de début janvier à fin avril (période la plus arrosée de l'année), les vitesses moyennes de déplacement planimétrique enregistrées sont :

- janvier/avril 2005 : environ 11 cm/mois (vitesse moyenne de l'ordre de 3 cm/mois sur le reste de l'année) ;
- janvier/avril 2006 : environ 35 cm/mois ; entre le 05 et 15 mars, la station s'est déplacée suivant Y d'environ 56 cm (passage de la forte tempête tropicale DIWA) ;
- janvier/avril 2008 : environ 30 cm/mois (pour la borne SAHB – cf. tableau n°3 – valeur voisine de 15 cm/mois sur la période Sept. 2007/Mars 2008, ce qui semble cohérent si on « écarte » les mois de septembre à novembre au cours desquels les déplacements ont vraisemblablement été limités).

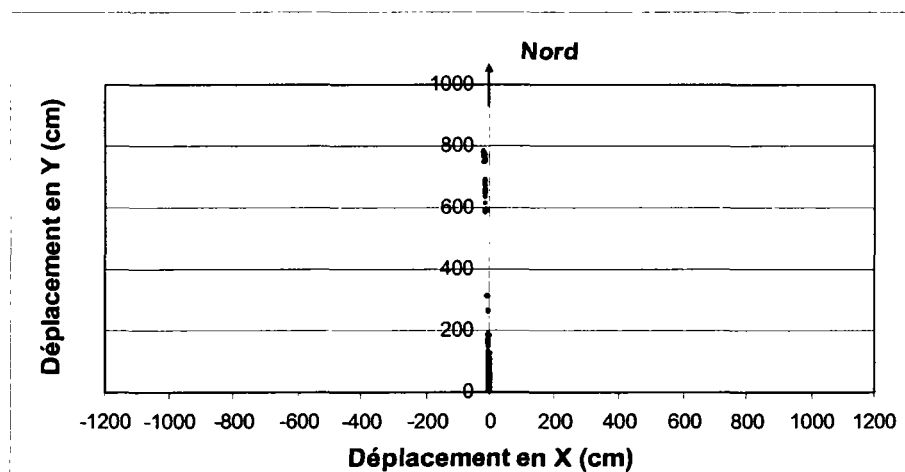


Figure 46 : Orientation du déplacement

3.3.2 Déplacements altimétriques

La station met en évidence un tassement global sur la période d'enregistrement de l'ordre de 1,10 m (soit environ 7 fois moins que le déplacement planimétrique enregistré sur la même période). Cette valeur est cohérente avec les valeurs mises en évidence sur les bornes voisines :

- borne SA002, située environ 70 m au sud-est de la station permanente : tassement voisin de 1,50 m ;
- borne SAHB située « au pied » de la station permanente : tassement de 0,10 m entre novembre 2007 et février 2008, soit 1,20 m rapporté sur la période fin 2003/mai 2008.

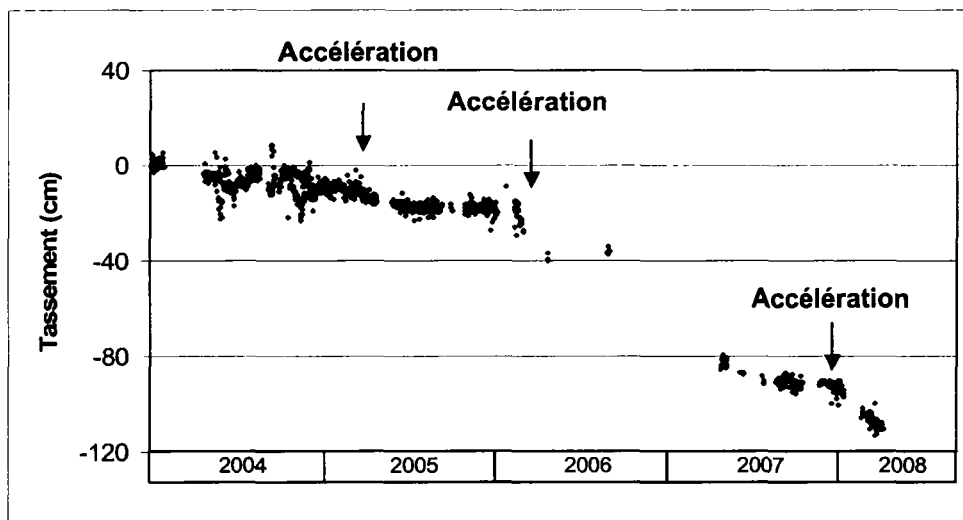


Figure 47 : Station GPS permanente d'Hell-Bourg – déplacements en Z

4 Mécanismes de mouvement

4.1 Approche sur la relation pluies / mouvements

Le rapport BRGM/RP-56708-FR, dont les principaux éléments ci-dessous sont extraits, détaille la méthodologie suivie concernant la mise en relation des données GPS et pluviométriques.

4.1.1 Données brutes

Le graphique ci-dessous met en parallèle la courbe des déplacements planimétriques (selon Y – direction Nord) enregistrée sur la station GPS permanente de Mare à Poule d'Eau entre début 2004 et mai 2008, avec la pluviométrie (station automatique de Ilet à Vidot). La courbe de déplacement a été lissée de façon à en « extraire » le bruit de fond (inhérent à toute technique de mesure de positionnement), et ainsi améliorer l'interprétation des résultats.

Le « trou » dans la courbe de déplacement (à cheval sur les années 2006 et 2007) résulte de périodes d'interruption dans l'acquisition des données incombant notamment à un taux de panne non négligeable de la station GPS. On déplorera notamment de ne pouvoir exploiter le passage du cyclone tropical intense « Gamède »

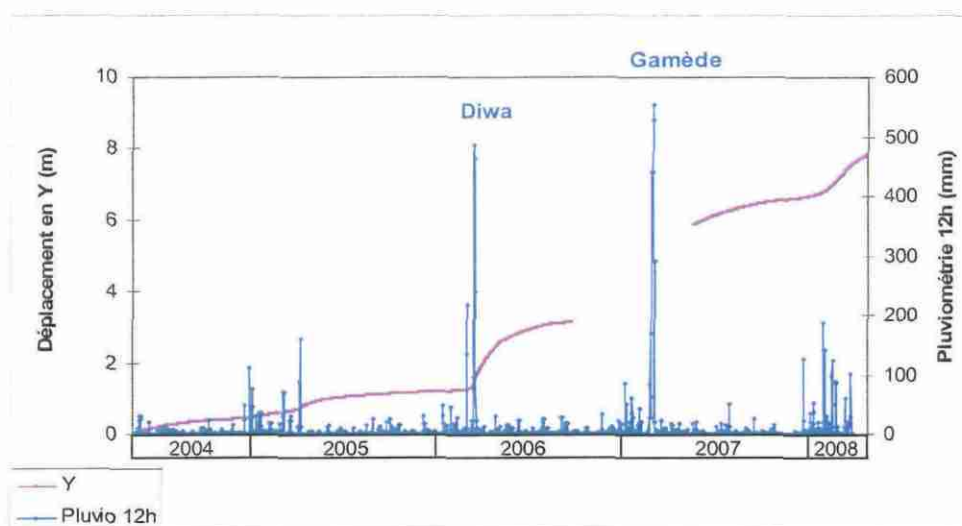


Figure 48 : Mise en parallèle « Déplacement, direction nord / Pluviométrie »

La **Figure 49** page suivante présente par ailleurs la relation entre la vitesse de déplacement et la pluviométrie.

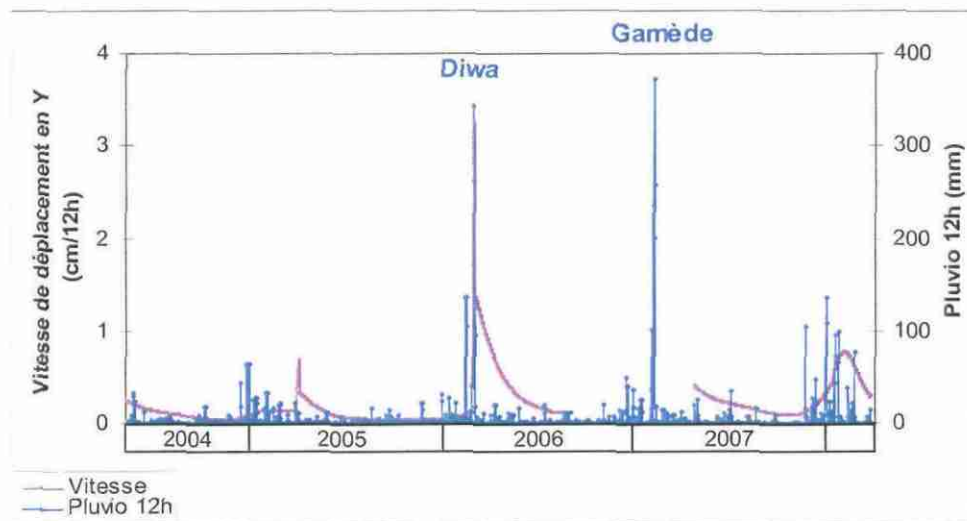


Figure 49 : Mise en parallèle « Vitesse de déplacement, direction Est / Pluviométrie »

Ces graphiques appellent les principaux commentaires suivants :

- le glissement d'Hell-Bourg présente une vitesse de déplacement « de croisière », due à son inertie (en dehors des différentes phases d'accélération et de ralentissement observées), de l'ordre de 0,7 mm/jour, soit environ 26 cm/an ;

- Trois principales phases d'accélération des mouvements ont été enregistrées. La première phase d'accélération, relativement modeste, est survenue de façon progressive en fin d'année 2004, en réponse à une pluviométrie relativement importante (mais sans épisode extrême) au cours du mois de décembre (270 mm au cours de la première quinzaine, 340 mm environ au cours de la seconde quinzaine, soit au total environ 610 mm, avec un maximum en 24 h de l'ordre de 130 mm). Suite à cette accélération, les mouvements se sont poursuivis pendant environ 3 mois à vitesse constante. Sur cette période, la pluviométrie a été relativement modeste (cumul maximum sur 15 j de 183 mm ; 520 mm sur la période début janvier à mi-mars), mais suffisante pour qu'il n'y ait pas amortissement mais au contraire maintien de la vitesse acquise par le mouvement après la première accélération.

Une deuxième accélération, brutale cette fois, s'est déroulée sur quelques jours à partir du 20 mars 2005. Elle est à rattacher à un épisode pluvieux ayant généré sur le poste d'Ilet à Vidot un cumul de 90 mm environ du 19 au 23 mars (il est plausible que le cumul au niveau du plateau de Mare à Poule d'Eau pour cet épisode ait été sensiblement plus important compte tenu de la forte variabilité spatiale des précipitations). Suite à cet épisode, les précipitations ont été très limitées et le mouvement a connu un ralentissement progressif (retour « à la normale » - c'est-à-dire à une vitesse comparable à ce qu'elle était avant la première accélération – vers le début du mois d'août, nécessitant ainsi environ 4 mois).

On tirera comme premier enseignement que la sensibilité du glissement à la pluviométrie semble importante, des cumuls relativement limités pouvant entraîner un début d'accélération sensible des mouvements et la persistance d'une pluviométrie modeste mais plus ou moins continue étant de nature à entretenir cette phase d'accélération.

- La deuxième phase d'accélération est due au passage de la forte tempête tropicale Diwa. L'accélération a été très brutale, avec un pic atteignant près de 7 cm/jour, observé trois jours environ après le pic de pluies. Diwa a généré un cumul de précipitations sur le poste d'Ilet à Vidot de l'ordre de 1860 mm du 03 au 08 mars (523 mm et 687 mm les 03 et 04). Après cet épisode, les pluies ont été faibles jusqu'en fin de saison humide. Les mouvements ont alors connu un ralentissement rapide dans un premier temps (pas de pluies significatives alimentant le mécanisme comme au cours des premiers mois de 2005), puis un amortissement progressif dans un second temps avec là également un retour « à la normale » intervenant au bout de 4 mois environ.

- Une troisième phase d'accélération a été enregistrée au cours de la saison des pluies 2007/08. Celle-ci n'a été affectée par aucun épisode cyclonique « d'envergure » mais est caractérisée par la succession entre le 20 décembre et le 25 mars de plusieurs épisodes pluvieux de moyenne importance (210 mm le 20/12, 300 mm au cours de la première décade de janvier, 536 mm du 29 au 31/01, près de 800 mm la seconde quinzaine de février, 155 mm le 25/03).

Entre le 19 décembre 2007 et début mars 2008, période à laquelle l'accélération a atteint son pic, le cumul des précipitations enregistrées sur le poste d'Ilet à Vidot a été d'environ 2170 mm.

Contrairement à l'accélération de 2006, et en raison de l'absence d'épisode majeur, l'accélération a cette fois été progressive, atteignant 1,5 cm/jour, avant que le ralentissement n'intervienne tout aussi progressivement (l'amortissement étant contrarié par les pluies survenues au cours de la fin de la saison humide).

- Le glissement semble avoir connu au cours de la saison 2006/07 un comportement comparable à celui enregistré au moment du passage de Diwa. On observe en effet la seconde partie d'une phase de ralentissement des mouvements, après une phase d'accélération non visible en raison des problèmes d'acquisition de la station GPS mais très probable et pouvant être rattachée au passage du cyclone tropical intense Gamède.

Le graphique ci-dessous, en reprenant les événements des années 2004 à 2006 (2007 du fait de l'absence de données et 2008 dépourvu de pic de pluie marqué ne sont pas exploités), souligne que **la relation entre le pic de vitesse de déplacement et le pic de pluies associé est vraisemblablement une relation linéaire²**. On gardera néanmoins à l'esprit qu'en raison du faible nombre d'épisodes pluvieux disponibles, cette hypothèse devra être confirmée à la lumière des prochaines acquisitions.

² Pour améliorer l'adéquation pluies/vitesses de déplacement, la pluviométrie du poste d'Hell-Bourg, de préférence à celle d'Ilet-à-Vidot, a été utilisée.

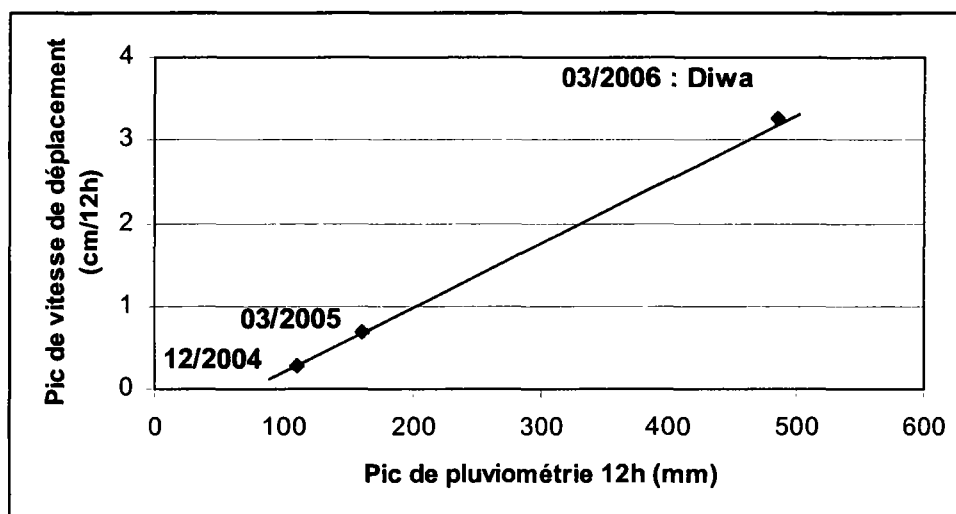


Figure 50 : Relation pic de pluies / pic de vitesse de déplacement

Le graphique ci-après établit par ailleurs la relation entre les déplacements planimétriques (selon Y – direction Nord) enregistrés sur la station GPS permanente et la pluviométrie (poste d'Hell-Bourg), en ne retenant pour chaque année que les valeurs cumulées pendant la saison cyclonique, soit la période courant du 15 novembre au 30 avril. Les années 2004 et 2007 ne sont pas représentées du fait de l'absence de séries de données de positionnement complètes sur la période considérée.

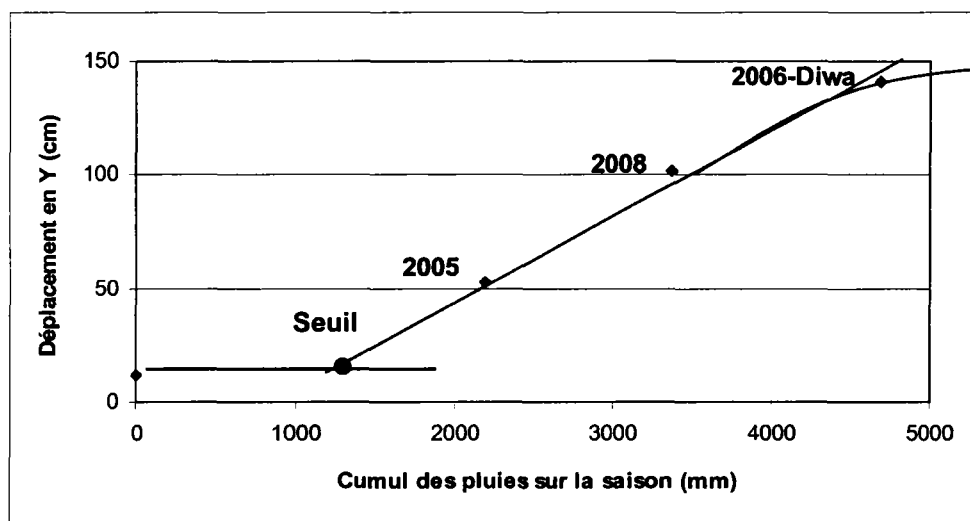


Figure 51 : Corrélation pluies/déplacements cumulés sur la période correspondant à la saison cyclonique

On a vu précédemment que la vitesse « de croisière » du mouvement (hors accélération liée à la pluviométrie) était de l'ordre de 26 cm/an, soit environ 12 cm/saison cyclonique (celle-ci durant 5 mois et demi).

Le graphique précédent tend à indiquer qu'il est nécessaire de **dépasser un seuil de pluies pour que le glissement accélère significativement**, ce seuil présumé se situant aux alentours de 1200 mm. Au-delà de ce seuil, le nombre d'années d'observation est trop faible pour apprécier correctement le mécanisme de mouvement du glissement de terrain, et notamment pour trancher entre l'hypothèse d'une relation pluies/déplacements linéaire et l'hypothèse selon laquelle cette relation aurait tendance à s'aplanir jusqu'à atteindre un palier à partir duquel un accroissement des précipitations n'a plus d'incidence sur l'ampleur des déplacements associés.

La poursuite des enregistrements, en augmentant la population d'événements « pluies/déplacements » exploitables, permettra d'argumenter en faveur de l'une ou l'autre de ces hypothèses.

4.1.2 Modèles prévisionnels

Le logiciel Tempo, qui a été développé par le BRGM pour le traitement et la modélisation de séries temporelles principalement dans les domaines de l'hydrogéologie et de l'hydrogéochemie, a été utilisé dans l'optique de déterminer une fonction de transfert entre la pluviométrie (poste d'Hell-Bourg) et les déplacements. La démarche suivie est détaillée dans le rapport BRGM/RP-56708-FR.

La fonction de transfert pluies/déplacements déterminée par Tempo permet d'établir plusieurs scénarii d'évolution possibles du glissement en fonction des hypothèses de précipitations retenues (reconstitution « simulée » de courbes d'évolution de vitesses et de déplacements).

La période Septembre 2006 - Mai 2007, dépourvue de données de déplacement, a été volontairement écartée de l'analyse pour ne pas forcer le modèle à des hypothèses non confirmées.

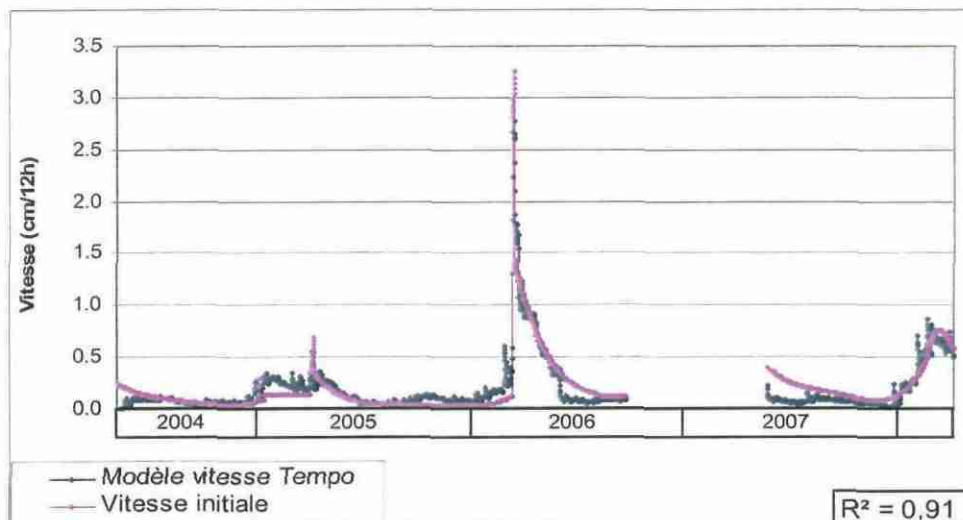


Figure 52 : Modèle sous Tempo

Le coefficient R^2 est un paramètre caractérisant la qualité de l'ajustement (l'ajustement du modèle est d'autant meilleur que R^2 est proche de 1). Le coefficient d'ajustement associé à la fonction de transfert du glissement d'Hell-Bourg peut être jugé satisfaisant ; la courbe du modèle Tempo s'ajuste plutôt bien avec la courbe des vitesses initiales.

Le modèle sert alors à recréer les vitesses (et implicitement les déplacements) associées à une nouvelle série de pluie. En reprenant la série de pluie entre 2004 et 2008, le logiciel Tempo permet ainsi de reconstituer le déplacement lié au passage du cyclone Gamède sur l'île (survenue au cours de la période de lacune des GPS).

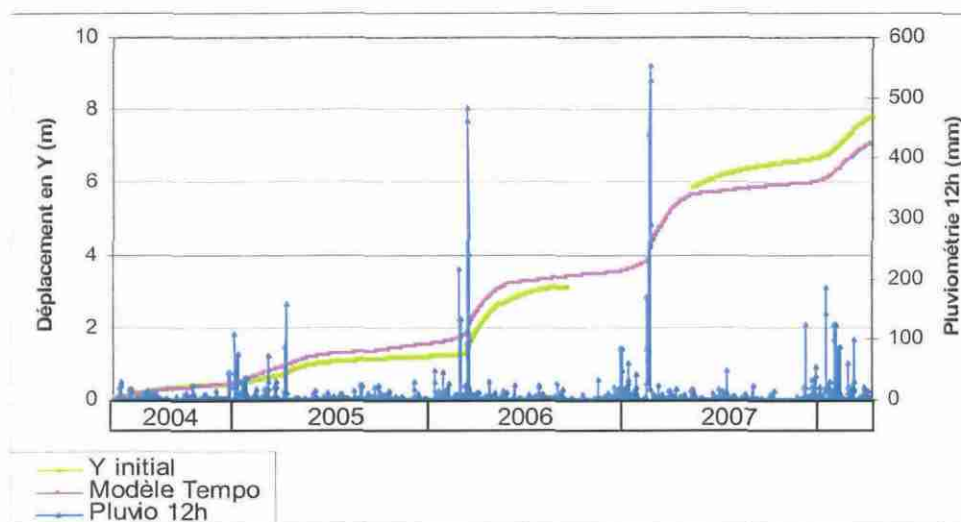


Figure 53 : Reconstitution des déplacements grâce à Tempo

La figure précédente met en évidence la qualité du modèle Tempo : l'ajustement du modèle n'est pas parfait mais l'allure générale de la courbe de déplacement est respectée. Pendant les années 2004 à 2006, Tempo reproduit les accélérations du mouvement en les surestimant (de l'ordre de quelques décimètres). Après la période de lacune, les mouvements reconstitués par Tempo sont au contraire sous-estimés. Le logiciel a donc sous-estimé le déplacement associé au passage de Gamède.

La fonction de transfert pluies/déplacements déterminée par Tempo permet d'établir plusieurs scénarii d'évolution possibles du glissement d'Hell-Bourg en fonction des hypothèses de précipitations retenues (reconstitution « simulée » de courbes d'évolution de vitesses et de déplacements). De façon à avoir - une plage d'observation plus large et intégrant notamment un nombre d'événements pluvieux à caractère exceptionnel plus significatif (« rajout » en l'occurrence du cyclone Dina de janvier 2002), la pluviométrie enregistrée sur le poste d'Hell-Bourg à partir de 2001 a été considérée.

Scénario 1 : Répétition à l'identique de la séquence pluviométrique 2002/2008 sur la période 2009/2015.

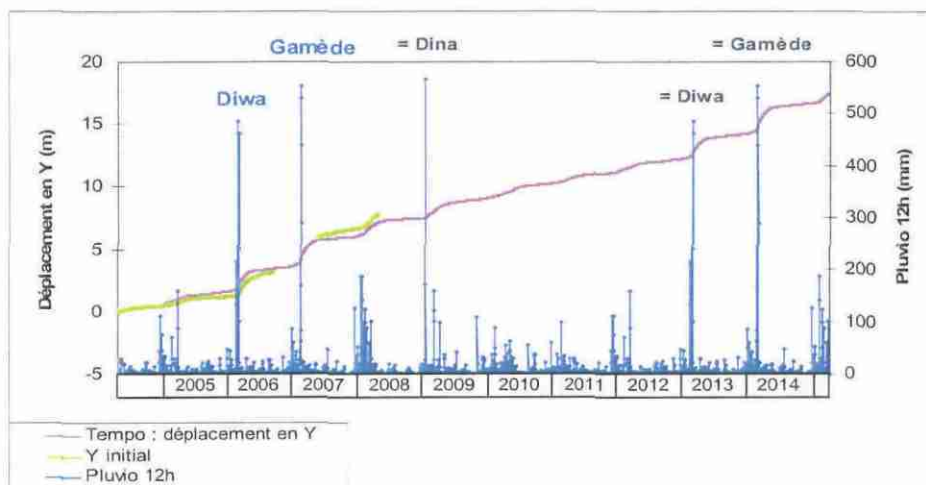


Figure 54 : Simulation Tempo – scénario 1

La figure ci-dessous met en relation le cumul des pluies pour chaque saison cyclonique avec le déplacement associé.

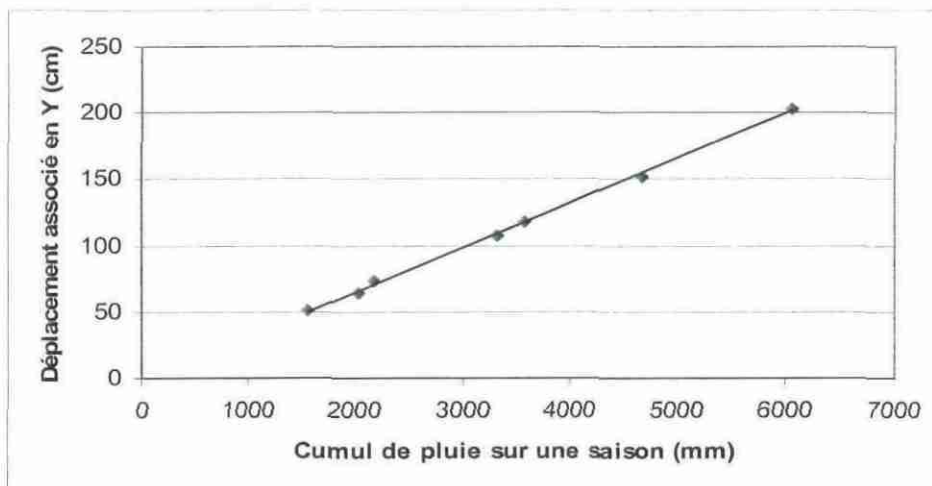


Figure 55 : Simulation Tempo – scénario 1, relation pluies/déplacements

Scénario 2 : Répétition de la séquence pluviométrique 2002/2008 sur la période 2009/2015, avec majoration selon un coefficient 1,5 des événements cycloniques.

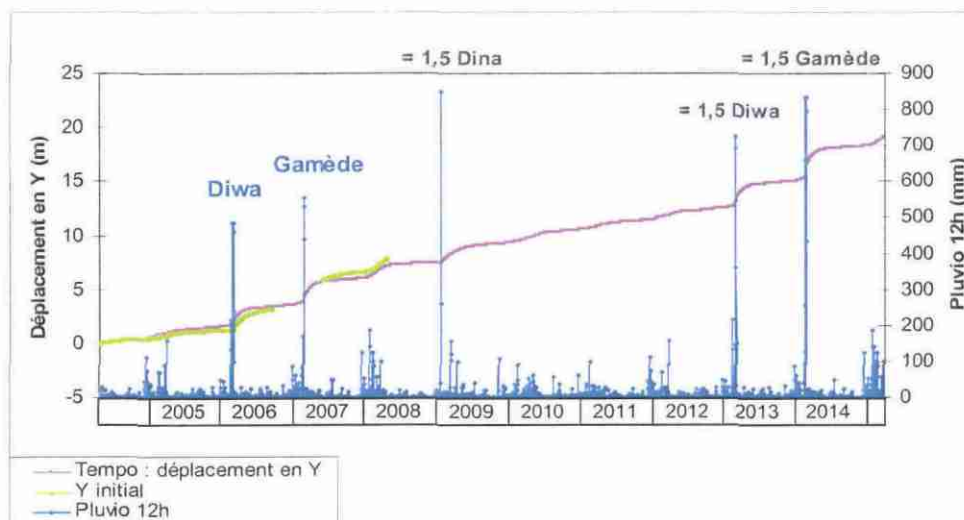


Figure 56 : Simulation Tempo – scénario 2

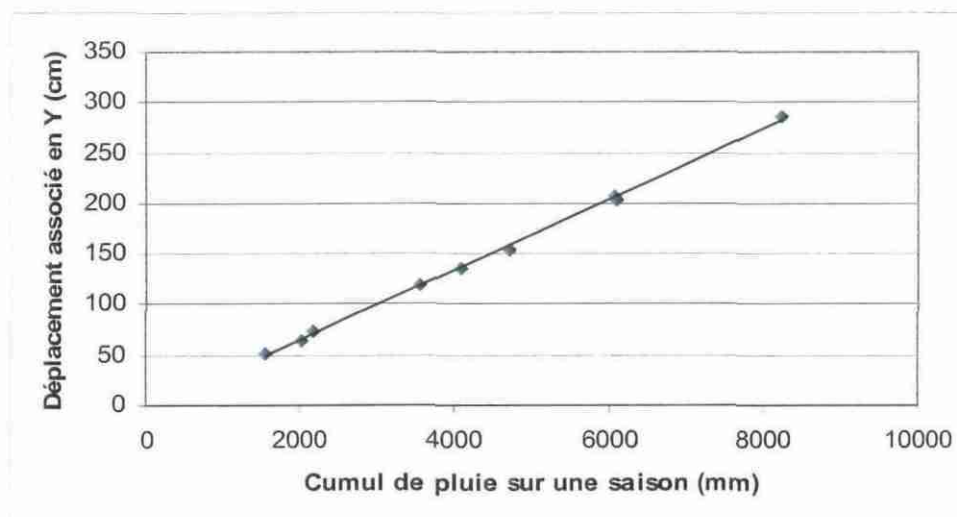


Figure 57 : Simulation Tempo – scénario 2, relation pluies/déplacements

Cette simulation a été répétée en multipliant successivement l'intensité des cyclones par 0.25, 0.5, 0.75, 1, 1.25, 1.5, 1.75 et 2. Afin de visualiser le comportement du glissement en fonction de l'intensité de l'événement pluvieux, le cumul de pluie sur la saison cyclonique a été mis en relation avec le déplacement associé en ne retenant qu'un seul épisode (en l'occurrence simulation de Gamède au cours de l'année 2014).

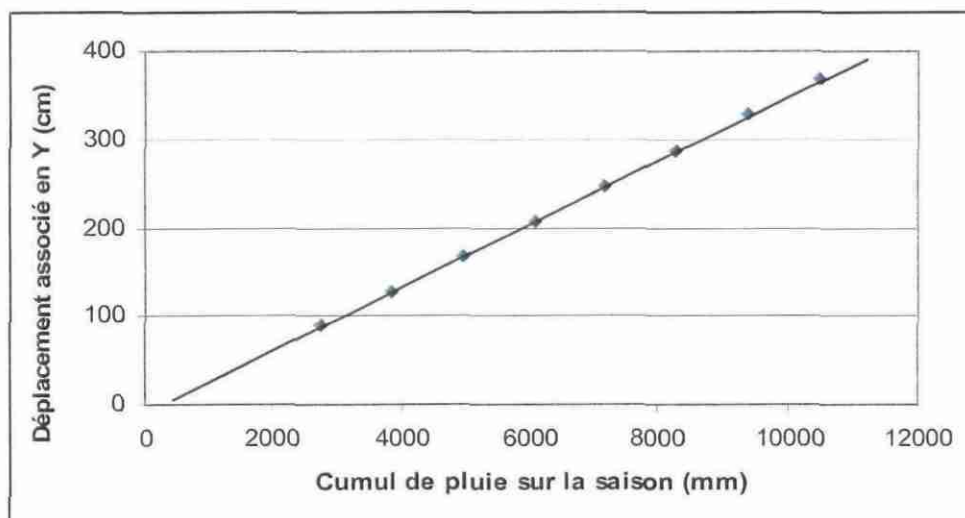


Figure 58 : Simulation Tempo – scénario 2, relation pluies/déplacements en fonction de l'intensité des cyclones

Ce graphique montre bien la linéarité entre l'ampleur des déplacements et la pluviométrie associée.

Scénario 3 : Génération d'un épisode cyclonique par saison des pluies (succession de la séquence Dina/Diwa/Gamède, sans coefficient majorateur).

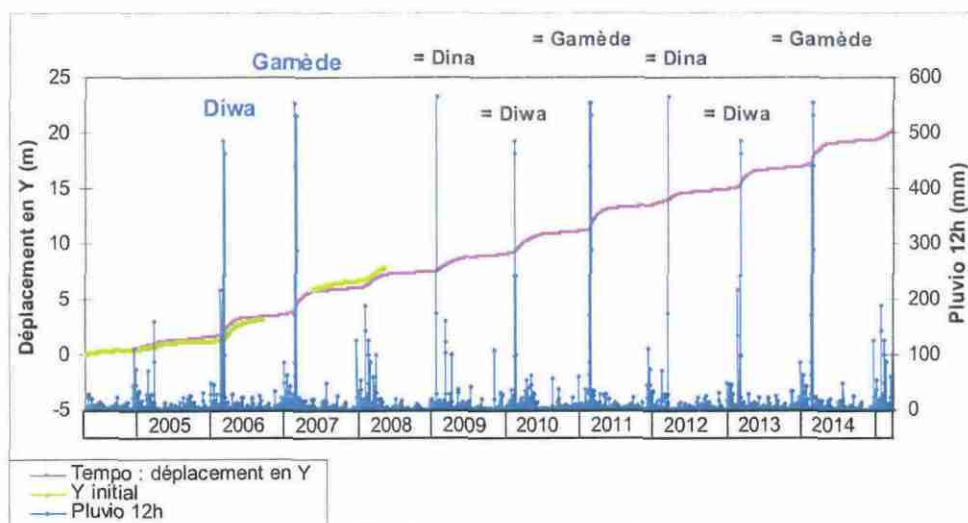


Figure 59 : Simulation Tempo – scénario 3

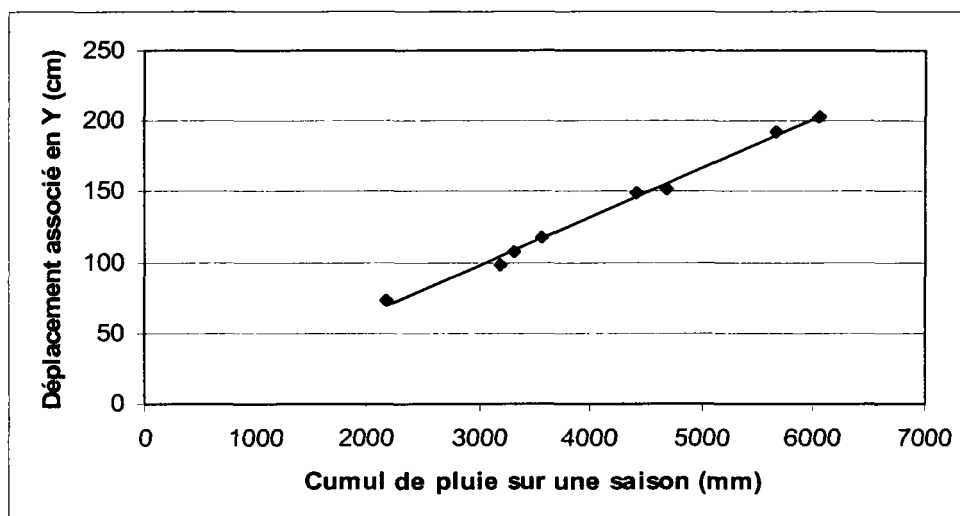


Figure 60 : Simulation Tempo – scénario 3, relation pluies/déplacements

Les graphiques précédents tendent à conforter l'hypothèse de l'existence **d'une relation linéaire entre la pluviométrie et les mouvements**. Quelque soit en effet le scénario considéré, l'occurrence d'un épisode pluvieux important se traduit par une accélération et des déplacements plus ou moins marqués, avant un amortissement qui semble intervenir de façon relativement analogue, tant en terme de délai après la fin de l'épisode pluvieux que de rapidité du retour à la normale.

On prendra ainsi pour exemple les scénarii 1 et 2, avec les épisodes simulés Diwa et Gamède (années 2013 et 2014) : les déplacements apparaissent proportionnels à l'intensité du cyclone (ici rapportée à l'importance des cumuls pluviométriques) puisqu'on retrouve également le coefficient 1,5 entre les valeurs de déplacement obtenus pour les deux scénarii. L'amortissement s'effectue sensiblement dans les mêmes conditions et on n'observe pas, dans le cas du scénario 2, d'amortissement en sortie d'épisode pluvieux à un palier de vitesses de déplacement qui soit significativement supérieure à celui du scénario 1.

L'ampleur des déplacements apparaît ainsi directement proportionnelle à la quantité de pluies tombées sur la zone glissée, soit résultant d'un événement isolé soit d'une accumulation d'épisodes pluvieux d'intensité plus modeste.

Le scénario 3 souligne quant-à-lui que la succession à un rythme soutenu d'événements pluvieux exceptionnels (un épisode cyclonique par saison des pluies) ne semble pas entraîner de phénomène de « fragilisation » de la masse en mouvement. On n'observe pas en effet sur la **Figure 57** d'accélération générale du glissement :

- pas d'amortissement en sortie de crise avec stabilisation à un palier de vitesse supérieure à celui existant avant l'événement ;
- maintien dans la durée (malgré la succession des épisodes pluvieux) d'une relation pluies/déplacements pseudo-linéaire. La courbe des déplacements, « lissée » sur la période 2008/2015, ne montre pas de franche incurvation traduisant un « emballement » du glissement en réponse à une « sollicitation cyclonique » importante.

4.1.3 Remarques

On insistera ici sur le fait que les données issues du logiciel Tempo ne doivent être considérées que comme des indications qu'il convient d'analyser avec précaution, leur fiabilité étant entachées notamment par la dispersion des valeurs de positionnement en planimétrie utilisées (cf. Paragraphes 3.3 et 4.1.1). En outre, la pertinence de la fonction de transfert définie est altérée par la discontinuité des données GPS acquises, qui ne permet pas notamment d'exploiter pleinement le passage de Gamède. Ainsi, le nombre d'événement pluvieux à caractère exceptionnel "disponibles" (pluviométrie + déplacements) se limite à Diwa (pas d'épisode cyclonique lors de la saison 2007/08).

En conséquence, les précédents enseignements notamment sur la linéarité de la relation pluies/déplacements devront être confrontés aux données issues d'une plage d'observation plus importante, ce qui sous-entend la poursuite du programme d'acquisition.

4.2 Dynamique de mouvement

Les plateaux d'Hell-Bourg, de Mare à Poule d'Eau et d'Ilet à Vidot constituent l'héritage de phénomènes gravitaires anciens de grande ampleur, s'apparentant à des déstabilisations massives des flancs du Piton des Neiges (avalanche de débris). Les phénomènes contemporains de glissement-tassement correspondent à une remobilisation des différentes unités bréchiques produites par ces processus anciens de démantèlement, avec morphologiquement deux grands ensembles :

- le secteur de Mare à Poule d'Eau/Fond de Rond Point, vaste panneau glissé scindé par plusieurs escarpements, présentant de nombreuses failles normales avec décalage en marches d'escalier, et dont le talus d'arrachement quasi-vertical en arc de cercle se prolonge depuis Bras sec à l'Ouest jusqu'à la Rivière du Mât à l'Est ;
- le secteur d'Ilet à Vidot, dont une des principales caractéristiques est d'être bordé, notamment au Nord et à l'Est par des versants en proie à une activité érosive intense et permanente (arrachements-éboulements-ravinement).

Les investigations réalisées dans le cadre du programme MVTerre suggèrent que la base du glissement repose sur les formations bréchiques des Brèches Noires, systématiquement située en interface entre le substratum et l'unité de Mare à Poule d'Eau. Ces matériaux ont été largement identifiées dans la Rivière du Mât depuis l'extrémité Nord-est de la zone glissée (à l'ouest immédiat de la Ravine drainant la mare à Poule d'Eau) jusqu'au droit d'Ilet à Vidot. Ils ont subi une intense altération et/ou hydrothermalisation, processus ayant conduit à une argilisation poussée. Ces brèches constituent un niveau de faible résistance et joueraient ainsi vraisemblablement le rôle de couche « savon », favorisant le glissement des niveaux sus-jacents. La patine lustrée des horizons supérieurs de cette formation ainsi que l'observation de stries (Arnaud N., 2005) constituent des arguments étayant cette hypothèse.

La genèse de cette brèche noire serait liée à un mécanisme de friction/broyage se produisant au contact des séries anciennes constituant le substratum du cirque (mylonite de base de l'ensemble glissé), au cours de l'événement majeur à l'origine de la formation des brèches. Les mouvements actuels pourraient de fait correspondre à une activité se produisant sur le même niveau de décollement que celui sur lequel s'est produit l'événement principal, c'est-à-dire les brèches noires.

Selon les observations issues de la cartographie au 1/10 000 du Cirque de Salazie conduite dans le cadre du projet Mvterre, l'axe de la Rivière du Mât constitue, au droit du glissement de Mare à Poule d'Eau, la charnière d'un pli anticlinal droit « crevé » correspondant à une zone de déformation majeure affectant les alluvions actuelles. La présence de structures actives compressives au pied du glissement (BRGM/RP-56281-FR) semble ainsi indiquer que l'anticlinal de la Rivière du Mât pourrait correspondre à une structure en « bourrage ». Ce schéma signifierait que le moteur du glissement ne se limite pas à un « simple » phénomène gravitaire entretenu voire amplifié par « l'appel au vide » généré par l'érosion des berges de La Rivière du Mât (suppression de la butée de pied), et impliquerait un ancrage en profondeur du corps du glissement (ce qui rend délicat l'estimation de la profondeur du glissement au droit de Fond de Rond Point).

En amont d'une zone en compression, qui correspondrait donc au pied du glissement au niveau de la Rivière du Mât, se trouverait une zone en distorsion, correspondant au secteur de Fond de Rond Point, au sein duquel se trouvent plusieurs structures hémisphériques emboîtées les unes dans les autres. Ces structures forment de petits reliefs « doux » et allongés, de concavité orientée préférentiellement vers le Nord, et s'apparentent à d'anciens horsts en voie de démantèlement.

La limite amont de cette zone de distorsion est marquée par l'escarpement principal du plateau de Mare à Poule d'Eau, qui correspond à une faille majeure se prolongeant du kiosque des Demoiselles au Sud jusqu'au versant rive gauche de la Rivière du Mât au Nord. Le passage de cette faille correspond à l'emplacement et à la direction des fissures sur la RD48 dans le secteur des « tournants Bambous ». Cet accident tectonique a vraisemblablement eu un rôle déclencheur prépondérant dans le mécanisme de glissement.

- Les données MVTerre (déplacements et pluviométrie) soulignent une dynamique de versant continue, avec des accélérations importantes lors de cumuls pluviométriques fortement excédentaires (épisodes cycloniques ou saison « globalement » fortement arrosée). Les déplacements planimétriques moyens ont ainsi été estimés à près d'une trentaine de centimètres par an dans la zone la plus active, indépendamment de toute influence des conditions météorologiques. Le moteur de ces mouvements pourrait correspondre à un phénomène de fluage, « contrôlé » par la pression lithostatique d'un ensemble profond, au contact d'horizons argilisés (Brèches Noires).

Une autre explication serait d'assimiler, comme dans le cas du glissement en masse de Grand Ilet, ce déplacement « de fond » à un mouvement gravitaire dans un contexte où la résistance résiduelle au cisaillement de la surface principale de glissement (résistance minorée par les processus ayant conduit à la mise en place des brèches) ne suffit plus à stabiliser le volume en mouvement.

La Rivière du Mât joue semble-t-il actuellement, en association avec l'aspect infiltration (cf. ci-après) un rôle « moteur » non négligeable, par sapement du front du glissement et suppression de la butée de pied. La forte crue qu'a connue le cours d'eau à l'occasion du passage de Hyacinthe a vraisemblablement contribué à une réactivation / amplification du glissement.

- La pluviométrie joue le rôle d'accélérateur des mouvements, et non un effet « déclencheur ». Les brèches constituant le corps et la base du glissement, bien que présentant une cohésion qui peut apparaître relativement bonne (des parois redressées - dont la tenue n'est cependant pas pérenne - peuvent être observées), sont globalement assez peu soudées. Dans les zones décomprimées, elles présentent une perméabilité pouvant être jugée relativement -élevée, accrue par ailleurs par une perméabilité « de fissures » liées aux intenses déformations subies par le matériel bréchique (lors de sa mise en place et ultérieurement du fait des mouvements « contemporains »).

Il existe une relation directe pluies/déplacements, qui s'explique probablement par un phénomène de mise en pression de la(des) surface(s) de cisaillement par les eaux d'infiltration rejoignant le corps du glissement. Bien qu'on ne puisse écarter le fait que lors de fortes pluies la cohésion des brèches diminue sous l'effet de la saturation entraînant une accentuation du phénomène de fluage, il apparaît plus probable que cette mise en pression soit liée à une alimentation du massif par le biais d'un réseau de fissures profond.

La réactivité rapide du système pluies/déplacements tend à démontrer que la part d'infiltration vers le plan de glissement est très importante. Elle pourrait ainsi s'expliquer par le fait que ces infiltrations se font prioritairement, et de façon assez directe, par le biais d'un réseau de fissures émergeant en surface (celui-ci étant voué à voir son ouverture s'accroître du fait de la poursuite des mouvements), et sont entretenues (dans un second temps) par les infiltrations directes à travers le matériel bréchique (avec des apports persistants dans le temps pouvant provenir de petits aquifères perchés faisant office de zones tampon, voire de petites mares sèches présentes sur les plateaux). Ce schéma permettrait d'expliquer le faible temps de réaction du glissement après le pic pluvieux et le fait que les mouvements ne s'amortissent que lentement après la fin des pluies (de l'ordre de 4 mois).

- L'existence d'un seuil minimum pluviométrique de 1200 mm pour générer une accélération significative du mouvement, tend à indiquer que la superficie de la surface de cisaillement est importante, et que l'adjonction d'une quantité d'eau suffisante est nécessaire soit pour provoquer une mise en pression brutale importante mais relativement localisée, soit pour induire une mise en pression plus modeste mais mieux répartie sur la surface de cisaillement.

Ce seuil est moitié moins important que celui déterminé pour le glissement de Grand Ilet (environ 2400 mm – cf. Rapport BRGM/RP-56708-FR). Cela pourrait s'expliquer par le fait que, contrairement à Grand Ilet, il est issu de mesures réalisées dans la partie la plus active du glissement, où les caractéristiques mécaniques des matériaux mobilisés par le mouvement sont vraisemblablement les plus remaniées, les rendant ainsi d'autant plus sensibles aux précipitations. De plus, là encore contrairement à Grand Ilet, le secteur de Mare à Poule d'Eau/Hell-Bourg est drainé par plusieurs émissaires, limitant lors de fortes pluies la quantité d'eau susceptible de s'infiltrer dans le corps de glissement, ce qui souligne d'autant plus la forte influence des conditions hydrogéologiques sur le comportement du glissement.

- L'examen de la relation pluies/déplacements cumulés sur une saison cyclonique (y compris sur des simulations de saisons très arrosées), montrant une certaine linéarité, voire une tendance à l'infléchissement, est plutôt rassurant. Cela tendrait à démontrer que le glissement n'est actuellement pas en capacité à "s'emballer".

Ces résultats sont à confirmer par la poursuite du projet de recherche, les observations (pluviométrie et déplacements) n'ayant pas été menées sur une période suffisamment longue.

5 Conclusions

Le mouvement de terrain de grande ampleur d'Hell-Bourg Ilet a fait l'objet, dans le cadre du programme de recherche MVTerre, de nombreux travaux, associant observations de terrain (relevé d'indices d'activité, etc.) et instrumentation. Ces dernières ont porté notamment sur le suivi des déplacements et des précipitations, avec la mise en place et l'exploitation de dispositifs de mesures de mouvements d'une part (GPS, bornes géodésiques) et d'un pluviomètre d'autre part. L'objectif était d'affiner la connaissance sur la répartition spatiale des mouvements et d'analyser la relation pluies-déplacements (amorces de mouvements, vitesses, etc).

- Le réseau géodésique d'Hell-Bourg/Mare à Poule d'Eau, constitué d'une trentaine de bornes, a fait l'objet de deux campagnes de mesures principales, l'une en 2003 (« état zéro »), la seconde fin 2007. Ce suivi a permis de mettre en évidence les principaux éléments suivants :

- **Existence d'un mouvement d'ensemble orienté selon une direction générale vers le Nord.** Seules quelques bornes, situées sur la bordure nord du plateau d'Hell-Bourg d'une part et sur Ilet à Vidot d'autre part montrent une composante ouest ou est significative, mais qui est vraisemblablement due au contexte topographique « local » (« appel au vide » en bordure de plateau, mouvements secondaires plus superficiels), ne remettant pas en question la direction générale du glissement.

- **La bordure Nord-ouest de Mare à Poule d'Eau ainsi que le secteur de Fond de Rond Point constituent les zones du glissement les plus actives,** avec des vitesses moyennes de déplacements planimétriques comprises entre près de 1 m/an et 1,70 m/an. On observe sur ces secteurs une décroissance des mouvements vers l'arrière - vers le Sud - du glissement, les terrains les plus actifs se trouvant « au contact » de la Rivière du Mât.

- **Les villages d'Hell-Bourg et de Mare à Poule d'Eau ne sont pas directement concernés par le phénomène** (vitesses de déplacement planimétriques - de l'ordre de 1,5 cm/an - non significatives). Sur Hell-Bourg, les mouvements n'affectent que la bordure Nord du plateau, sur une largeur de 50 à 70 m environ (vitesses planimétriques moyennes de l'ordre de 12 cm/an). Sur Mare à Poule d'Eau, seuls l'ancienne école et le lotissement des Bambous, en limite Sud du village, sont affectés par des mouvements qui sont vraisemblablement liés à un phénomène de décompression en arrière de la bordure du plateau.

- **Ilet à Vidot est en grande partie situé à l'intérieur de l'emprise du glissement.** Les vitesses de déplacement augmentent vers le Nord, passant de 4 cm/an environ à près de 20 cm/an dans la pointe septentrionale, ce qui témoigne d'une activité soutenue.

- **La superficie de la zone glissée a été estimée en première approche à environ 4,5 km².**

- Le glissement d'Hell-Bourg/Mare à Poule d'Eau correspond à une remobilisation de différentes unités bréchiques (notamment la formation de Mare à Poule d'Eau), héritage de phénomènes gravitaires anciens de grande ampleur ayant affecté les flancs du Piton des Neiges. **Le phénomène apparaît étroitement lié au contexte géologique et structural.** La base du glissement repose en effet sur les Brèches Noires, matériaux fortement altérés

représentant une surface de décollement privilégiée, tandis que la limite amont de la zone glissée correspond à un accident tectonique qui a vraisemblablement joué un rôle prépondérant dans le déclenchement du phénomène.

Alors que le moteur actuel du mouvement en masse est essentiellement gravitaire (les déplacements - certes modestes - se poursuivent tout au long de l'année, indépendamment de toute sollicitation en particulier pluviométrique), la Rivière du Mât par son action érosive au front du glissement et les précipitations constituent aujourd'hui des facteurs aggravants prépondérants. Il ressort ainsi des investigations réalisées dans le cadre du programme de recherche MVTerre qu'il existe une relation directe pluies/déplacements, liée probablement à une mise en pression hydraulique de la surface de glissement par les eaux d'infiltration.

- Le dispositif associant station GPS permanent et pluviomètre est opérationnel depuis fin 2003. Les déplacements enregistrés par le GPS fixe sont conformes, en valeur comme en orientation des mouvements, aux données issues du réseau géodésique.

L'analyse combinée de la pluviométrie et des déplacements enregistrés sur la station GPS fixe, réalisée à partir du logiciel Tempo développé par le BRGM, tend à mettre en lumière le fait que la relation directe entre ces deux paramètres est linéaire. Les simulations indiquent notamment :

- que les déplacements sont directement proportionnels à la quantité d'eau tombée au cours de la saison humide (et donc en mesure de s'infiltrer dans la zone en mouvement) ;
- que l'occurrence de saisons cycloniques très arrosées ne génère pas « d'emballlement » (accélération paroxysmale) du glissement, ce qui laisse supposer que les matériaux glissés conservent une certaine résistance au cisaillement ;
- qu'il est nécessaire de dépasser cumul pluviométrique d'environ 1200 mm sur la saison pour que les mouvements connaissent une accélération « franche ».

- L'analyse « combinée » des enregistrements géodésiques et de la pluviométrie ont permis de progresser significativement dans la connaissance du fonctionnement du glissement, et notamment sur la relation « pluies / déplacements ». Ces enseignements doivent cependant être pris avec beaucoup de précaution, dans la mesure notamment où la plage d'enregistrement pluies/déplacements est relativement limitée et le nombre d'épisodes pluvieux exceptionnels exploitables peut être jugé insuffisant. Ces avancées dans la connaissance sur la relation pluies/déplacements devront par conséquent être confortées par la poursuite du travail d'acquisition et d'interprétation.

Annexes

Annexe 1 – Réseau géodésique d'Hell-Bourg Ecart enregistrés entre les campagnes 2003 et 2007

POINTS	TYPE DE POINT	ECART XY (m)	VITESSE DE DEPLACEMENT (cm/an)	ECART Z (m)	GISEMENT (°)
SA 001	borne MVTerre	4,31	103,5	-0,07	359°2
SA 002	borne MVTerre	6,60	158,3	-1,55	358°4
SA 003	spit	4,78	114,8	-1,28	1°1
SA 004	borne MVTerre	6,96	167,1	-2,43	0°2
SA 005	borne MVTerre	4,52	108,5	-1,07	0°1
SA 006	spit	4,15	99,7	-0,98	357°3
SA 007	spit	4,53	108,6	-0,96	356°3
SA 008	borne MVTerre	3,90	93,5	-0,90	358°2
SA 010	spit	0,08	1,9	-0,04	298°1
SA 011	borne MVTerre	0,06	1,5	-0,05	304°5
SA 012	borne MVTerre	0,07	1,7	-0,06	303°4
SA 013	borne MVTerre	Borne "perdue" (parking)			
SA 014	spit	Borne en place mais non accessible			
SA 015	borne MVTerre	0,47	11,3	-0,61	303°2
SA 016	borne MVTerre	0,06	1,5	-0,05	290°0
SA 017	borne MVTerre	0,52	12,5	-0,58	352°1
SA 018	spit	0,06	1,3	-0,09	315°2
SA 019	borne MVTerre	0,37	9,0	-0,23	10°0
SA 020	borne MVTerre	0,18	4,2	-0,25	9°3
SA 021	borne MVTerre	0,45	10,7	-0,21	17°5
SA 022	borne MVTerre	0,74	17,8	-1,27	14°4
SA 023	borne MVTerre	0,70	16,7	-1,56	22°2
SA 024	borne MVTerre	0,80	19,3	-0,26	333°4
SA 025	borne MVTerre	0,27	6,4	-0,18	356°2
IGN2107	borne IGN	0,69	16,5	-0,60	9°3



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
BP 906
97478 Saint-Denis – Réunion – France
Tél. : 02.62.21.22.14