

Suivi des réseaux géodésiques dans les cirques de La Réunion

Rapport final

BRGM/RP-61994-FR

Octobre 2013

PO FEDER 2007-2013 - Mesure 3-20
Soutenir la Recherche et Développement
sur les phénomènes de risque naturel

Module 2 - Détection et suivi des mouvements de terrain de grande ampleur

MvTerre 2

Détection, suivi et modélisation des Mouvements de Terrain de grande ampleur dans les cirques de La Réunion



Suivi des réseaux géodésiques dans les cirques de La Réunion

Rapport final

BRGM/RP-61994-FR

Octobre 2013

Étude réalisée dans le cadre des projets
de recherche du BRGM 2009 PDR09REU01

R. MAZUE, B. AUNAY, P. BELLE

Vérificateur :

Nom : T. DEWEZ

Date : 03/05/2013

Original Signé

Approbateur :

Nom : S. BES DE BERG

Date : 10/09/2013

Original Signé

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 : Ile de La Réunion, mouvements de terrain, GPS, GNSS, réseau géodésique, risques naturels, bornes géodésiques, cirques, Cilaos, Mafate, Salazie.

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante :
Mazué R., Aunay B., Belle P. (2012) – Suivi des réseaux géodésiques dans les cirques de La Réunion – Rapport BRGM/RP-61994-FR, 57 p.

© BRGM, 2013, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

Synthèse

Dans le cadre de la mesure 3-20 "Soutenir la Recherche et Développement sur les phénomènes de risque naturel", MvTerre-2 est un projet de recherche cofinancé par le PO FEDER 2007-2013, le FIDOM, la Région Réunion et le BRGM.

L'île de La Réunion se singularise par la coexistence de plusieurs paramètres majeurs de prédisposition aux mouvements de terrains de grande ampleur (supérieurs au million de m³) : (i) relief très marqué avec un point culminant à 3 069 m, des escarpements exceptionnels pouvant atteindre 1 500 m de dénivelé pour une pente moyenne excédant 70°, des vallées et des cirques naturels très encaissés ; (ii) géologie jeune avec un édifice volcanique s'étant développé il y a moins de 3 millions d'années ; (iii) climat tropical humide, la Réunion détenant tous les records mondiaux de précipitation entre 12 heures (1170 mm) et 15 jours (6083 mm).

Le projet MvTerre-2 s'organise autour de trois objectifs principaux :

- > **M1 - Analyse des paramètres géomorphologiques de prédisposition.** Il s'agit d'établir les relations entre la géologie, le relief, l'hydrologie, l'hydrogéologie et les mouvements de grande ampleur. La finalité est d'affiner les paramètres de prédisposition géomorphologiques guidant le développement et la poursuite des mouvements de grande ampleur afin de mieux hiérarchiser l'aléa lié aux mouvements de grande ampleur dans les cirques.
- > **M2 - La poursuite de la détection et du suivi des mouvements de terrain de grande ampleur** vise à compléter l'instrumentation et le suivi des glissements de terrain (GPS fixe, réseau géodésique, débit des sources, piézométrie, méthodes spatiales...).
- > **M3 - L'étude et la modélisation du comportement des mouvements de grande ampleur.** Il s'agit d'analyser l'ensemble des données acquises dans les autres modules du projet. La finalité est de réaliser un modèle numérique de comportement sur le site de Grand-Ilet, visant à simuler les comportements réellement observés. Plusieurs approches de modélisation seront mises en œuvre. Le principal intérêt de ce type de modèle est de pouvoir ensuite faire varier les paramètres d'entrée (pluviométrie principalement, mais aussi paramètres de résistance au cisaillement des matériaux ou érosion des terrains en pied de glissement, etc.) afin d'examiner les conséquences en matière de circulation des eaux souterraines, de déplacement ou de stabilité. Des tendances pourront ainsi être dégagées, celles-ci pouvant ultérieurement servir de base pour des projets opérationnels d'aménagement ou de surveillance.

Il est important de noter que la détection et le suivi des mouvements de terrains présentés dans cette étude s'appliquent à des phénomènes lents (quelques cm à quelques m/an). Les phénomènes beaucoup plus brutaux de type éboulement ne font pas l'objet du présent rapport.

Ce rapport final MvTerre-2 (module M2) s'inscrit dans la continuité du rapport BRGM RP-59019-FR (Barbier & Aunay, 2011). Son objectif est de synthétiser et interpréter les données géodésiques récoltées depuis le lancement du projet en 2003.

Chaque réseau apporte une somme d'informations pour l'étude des mouvements de terrains de grande ampleur. Le réseau de bornes géodésiques détermine spatialement les déplacements (vitesse et géométrie) au sein des trois cirques de La Réunion depuis 2003. Le réseau de GPS permanent cible un territoire plus restreint : le cirque de Salazie. En effet, au vu des glissements observés (Tableau 1), une analyse temporelle fine donne une idée précise de la saisonnalité des vitesses de déplacement.

Aussi, l'analyse critique des mesures GPS montre qu'au-delà d'une certaine précision (centimétrique à infracentimétrique), la validité des données de déplacement est une grandeur que seule la répétabilité des mesures et l'analyse au cas par cas permettent d'appréhender.

Cirque de Mafate : quasi-absence de déplacements sur les entités marquées par une géomorphologie de glissement de terrain de grande ampleur depuis août 2003. Seules les mesures postérieures à 2010 (date d'acquisition du nouveau dispositif GNSS) permettent de détecter des mouvements d'ordre centimétriques à pluricentimétriques à Marla, Roche Plate et îlet des Lataniers. Les faibles déplacements enregistrés sont à relativiser. D'une part, la densité du réseau géodésique ne permet pas d'être exhaustif sur la distribution spatiale des observations. D'autre part, le comportement enregistré depuis 2003 ne prédispose pas d'une stabilisation définitive de ces phénomènes qui pourraient être réactivés lors d'évènements pluvieux intenses

Cirque de Cilaos : peu de déplacements sont mesurés. Les rares secteurs marqués par des déplacements en bordure est du cirque (Ilet du Bonnet Carré et Cap Sylvestre) sont mesurés sur une période qui englobe les deux principaux évènements pluvieux de ces dix dernières années (Diwa – 2006 et Gamède – 2007). En dehors de ces deux principaux évènements on observe une quasi-absence de déplacement sur l'ensemble du cirque. Comme pour Mafate, cette quasi-absence reste à relativiser par la densité du réseau.

Cirque de Salazie : plusieurs glissements actifs sont identifiés et font l'objet d'une étude plus approfondie. La densité du réseau de bornes et le déploiement de GPS permanents permettent de les caractériser (Tableau 1).

Glissement	Géométrie		Antenne GPS	Vitesse planimétrique (m/an)					Tassement vertical (m/an)
	Inclinaison de déplacement	Orientation		Moyenne annuelle (2010 / 2011)	Moyenne annuelle (2011 / 2012)	Minimale	Max. 2011	Max. 2012	
Fond de Rond-Point	13°	nord	VIRA	0.39	0.54	0.2	1.83	2.09	0.07
			FDRP	0.34	0.41	0.2	0.88	1.1	0.1
Grand Ilet	15°	nord-est	GINO	0.18	0.19	0.13	0.24	0.34	0.05
			GIAB	0.12	0.13	0.09	0.16	0.29	0.025
			GIEG	0.12	0.13	0.09	0.16	0.24	0.05
Maturin		sud-sud-est	MAT	0.12	0.15	0.07	0.44	0.66	0.025
Mare à Goyave		sud	MAG	0.08	0.24	0.07	0.07	0.95	0.1
Ilet à Vidot		nord-nord-est	IAVI	0.06	0.010	0.04	0.11	0.29	0.06

Tableau 1 : synthèse des données pour les glissements du cirque de Salazie.

Sommaire

1. Introduction	14
2. Réseau de bornes géodésiques.....	15
2.1. PRESENTATION DU RESEAU ET DES DONNEES ASSOCIES.....	15
2.2. CONTROLE DE LA QUALITE DU POSITIONNEMENT GPS.....	17
2.3. ANALYSE CRITIQUE DES DEPLACEMENTS.....	20
2.3.1. Déplacement planimétrique	20
2.3.2. Tassement	21
2.4. DETERMINATION DE L'INCERTITUDE DES MESURES.....	22
2.4.1. Incertitude de positionnement	22
2.4.2. Incertitude sur les différentes variables du déplacement	23
2.5. PRESENTATION DES RESULTATS	24
2.5.1. Réseau du cirque de Cilaos	24
2.5.2. Réseau du cirque de Mafate	25
2.5.3. Réseau du cirque de Salazie.....	30
2.5.4. Tassement des glissements	35
2.6. PERENNISATION DU RESEAU	37
2.7. CONCLUSION ET PERSPECTIVE	38
3. Réseau de GPS permanents.....	39
3.1. PRESENTATION DU DISPOSITIF ET DE SON JEU DE DONNEES.....	39
3.2. ANALYSE DES PERTES DE DONNEES.....	41
3.3. ANALYSE DE LA PRECISION	42
3.4. LISSAGE DES COURBES DE VITESSE DE DEPLACEMENT	43
3.4.1. Méthode des moyennes mobiles	43
3.4.2. Détermination de la période	43
3.4.3. Evaluation de la méthode	44
3.5. RESULTATS	45
3.5.1. Déplacements planimétriques	45
3.5.2. Tassements.....	46
3.5.3. Vitesses de déplacement planimétriques	47

3.6. CONCLUSION ET PERSPECTIVE	50
4. Exploitation des résultats issus des réseaux géodésiques	51
4.1. COMPARAISON DES DEPLACEMENTS ISSUS DES BORNES GEODESIQUES ET DES GPS PERMANENTS	51
4.2. DELIMITATION DES GLISSEMENTS DE <i>FOND DE ROND-POINT ET GRAND ILET</i> 52	
4.3. ORGANISATION SPATIALE DES VITESSES SUR LES GLISSEMENTS DE <i>FOND DE ROND-POINT ET GRAND ILET</i>	53
4.4. INCLINAISON DU DEPLACEMENT DES PRINCIPAUX GLISSEMENTS	55
4.5. MISE EN EVIDENCE DE LA RELATION PLUIES / DEPLACEMENT	58
4.6. CONCLUSION	61
5. Conclusion et perspective.....	63
Annexes sur CD	65

Liste des illustrations

Illustration 1 : chronologie des campagnes de mesure. En bleu foncé, les 9 tournées complètes ; en bleu clair, les 7 tournées 'partielles'	15
Illustration 2 : réseau géodésique des trois cirques de la Réunion.	16
Illustration 3 : box plots des CQ2D et 3D pour les tournées n°15 et 16. Les données sont exprimées en cm.	18
Illustration 4 : carte des CQ (Coordinate Quality) 2D et 3D des campagnes de mesure T15 (déc. 2011) et T16 (juin 2012). Les intervalles de classification des valeurs sont exprimés en mètre. L'indice entre parenthèses donne le nombre de borne par classe. A droite, les histogrammes de répartition de chaque variables en m.....	19
Illustration 5 : graphes orthonormés présentant six chroniques de position de repères géodésiques. Les points numérotés de t1 à t16 correspondent à la chronologie des 16 tournées avec t1 = août 2003 et t16 = juin 2012. Les unités des graphes sont exprimées en mètre.	21
Illustration 6 : statistiques, descriptives des variables DX, DY et DZ qui sont les mesures des écarts de position des éléments géodésiques 'immobiles' selon les axes X, Y et Z.	22
Illustration 7 : sphère d'incertitude de positionnement dans le cirque de Salazie à 95% (2 σ).....	23
Illustration 8 : graphes orthonormés des chroniques, de gauche à droite, CI08 – CI26 – CI28.....	25
Illustration 9 : graphes orthonormés, d'échelle centimétrique (chaque carré indique une surface de 1 cm ²), présentant les séries de positions des bornes : MA08, MA11, MA14 et MA15. Les étiquettes t10 à t16 se réfèrent aux tournées.	28

Illustration 10 : déplacement planimétrique des bornes de Mafate pour la période février 2010/juillet 2012. Pour les déplacements inférieurs à 2 cm, l'information de direction n'est pas prise en compte pour éviter les interprétations non significatives.	29
Illustration 11 : érosion régressive sur la rive gauche de la ravine Roche à Jacquot (secteur Maturin) après le passage des cyclones Diwa et Gamède. ©Google Earth	31
Illustration 12 : vitesses annuelles de déplacements planimétriques en m/an sur le cirque de Cilaos.	32
Illustration 13 : vitesses annuelles de déplacements planimétriques en m/an sur le cirque de Mafate.	33
Illustration 14 : vitesses annuelles de déplacements planimétriques en m/a et localisation des principaux glissements.	34
Illustration 15 : graphes orthonormés de tassement des bornes (de gauche à droite) CI23, CI08 et IGN0813. En abscisse, déplacement planimétrique cumulé en mètre ; en ordonné, tassement cumulé en mètre.	35
Illustration 16 : carte de vitesses annuelles de tassement des terrains sur le cirque de Salazie. En légende : les tassements sont exprimés en mètre. L'indice entre parenthèses correspond au nombre de borne par classe. Sur la carte : les indices présents à droite de chaque symbole indiquent la vitesse du tassement en m/an.	36
Illustration 17 : cumul annuel des pluies en mm pour les stations Météo France de Cilaos (97424410), La Nouvelle (97408580) et Aurère (97408560).....	38
Illustration 18 : réseau de GPS permanents.	40
Illustration 19 : perte de données en bleu pour la stations MAT.	41
Illustration 20 : représentation du bruit des données de vitesses non lissées et mesure du décalage du début des phases d'accélération produit par la méthode de lissage par moyenne mobile sur la station VIRA.	43
Illustration 21 : détermination des f_c sur les périodogrammes de VIRA X et VIRA Y. L'axe des abscisses correspond à l'indice de corrélation ; l'axe des ordonnées à la période en h^{-1}	44
Illustration 22 : déplacement planimétrique des GPS permanents en m.	45
Illustration 23 : tassement des GPS permanent. Pour une meilleure visualisation, les tassements sont représentés sur une échelle relative d'unité 2 cm.	46
Illustration 24 : courbe de vitesse en m/jour des GPS sur le glissement de Fond de Rond-Point.	48
Illustration 25 : courbe de vitesse en m/jour des GPS sur le glissement de Grand Ilet.	48
Illustration 26 : courbe de vitesse en m/jour des GPS sur les glissementst de Maturin et Mare à Goyave.....	49
Illustration 27 : courbe de vitesse en m/jour des antennes MAPE, HELB et IAVI.	49
Illustration 28 : délimitation approximative des glissement de Grand Ilet et Fond de Rond-Point.	53
Illustration 29 : organisation spatiale des vitesses sur les glissements de Grand Ilet et de Fond de Rond-Point.	54
Illustration 30 : rapport entre la distance des bornes par rapport au pied du glissement et les vitesses de déplacement sur Grand Ilet. La distance borne / pied de glissement (tireté noir sur l'extrait de carte IGN) et mesurée parallèlement à la direction du glissement (flèche noir sur l'extrait de carte IGN).	55

Illustration 31 : graphe orthonormé métrique présentant, pour chaque grand glissement, en abscisse le déplacement planimétrique et en ordonnée le tassement des bornes. Quatre droites de régression caractérisent la pente moyenne des glissements.	56
Illustration 32 : carte de pente des mouvements de terrains sur le cirque de Salazie. En légende les pentes sont exprimées en degrés. L'indice entre parenthèses correspond au nombre de borne par classe.	57
Illustration 33 : cumul des précipitation en mm sur les quatre premiers mois des années 2011 et 2012 pour les stations météo de Grand Ilet (GI,) Ilet a Vidot (IAVI) et Salazie.	58
Illustration 34 : vitesses de déplacement en m/j des antennes du glissement de Fond de Rond-Point et cumul journalier des précipitations sur la station météo d'Ilet à Vidot.	59
Illustration 35 : vitesses de déplacement en m/j des antennes du glissement de Grand Ilet et cumul journalier des précipitations sur la station météo de Grand Ilet.	59
Illustration 36 : vitesses de déplacement en m/j des antennes du glissement de Maturin et cumul journalier des précipitations sur la station météo de Grand Ilet.	60
Illustration 37 : vitesses de déplacement en m/j des antennes MAPE, HELB et IAVI et cumul journalier des précipitations sur la station météo d'Ilet à Vidot.	60
Illustration 38 : vitesses de déplacement en m/j des antennes du glissement de Mare à Goyave et cumul journalier des précipitations sur la station météo de Salazie.....	61

Liste des tableaux

Tableau 1 : synthèse des données pour les glissements du cirque de Salazie.	7
Tableau 2 : distribution des CQ2D et 3D pour les tournées n°15 et 16. Les données sont exprimées en cm. La population de T15 et de 188, celle de T16 et de 180.	18
Tableau 3: écart type et incertitude a 95% relatif au données du réseau de bornes géodésiques. En grisée, les valeurs retenues pour l'estimation de l'incertitude de dépalcement.....	23
Tableau 4 : déplacements planimétriques cumulés depuis février 2010. Le curseur bleu donne un aperçu des valeurs de déplacements,	27
Tableau 5 : bilan du % de valeurs manquantes et aberrantes.	42
Tableau 7 - Tableau 6 : comparaison des déplacements entre les GPS permanents et les bornes géodésiques voisines.	52

Liste des annexes sur CD

Annexe 1 : tableau de suivi du réseau de bornes géodésiques.

Annexe 2 : tableau de calcul des déplacements des bornes géodésiques.

Annexe 3 : tableau de calcul des déplacements des bornes géodésiques sur la plus longue période d'enregistrement.

Annexe 4 : tableau présentant une analyse des mouvements des bornes géodésiques fondé sur l'observation de graphes de déplacements et de tassements orthonormés.

Annexe 5 : tableau filtrant les enregistrements considérés comme aberrants.

Annexe 6 : tableau de calcul du lissage des courbes de vitesse de déplacement par la méthode des moyennes mobiles et graphes présentant les courbes de vitesse pour chaque glissement.

Lexique du positionnement GPS

GNSS : système de positionnement par satellites (Global Navigation Satellite System) qui utilise les constellations américaine (GPS) et russe (GLONASS), à l'inverse du système GPS comptant uniquement sur la constellation américaine.

Leica 500 : système de GPS Différentiel (DGPS) fabriqué par Leica Geosystems qui utilise uniquement la constellation GPS

Leica 1200 : système de GNSS Différentiel (DGPS) fabriqué par Leica Geosystems qui utilise les constellations GPS et GLONASS.

CQ (Coordinate Quality) : indice donnant une estimation de la précision du positionnement GPS / GNSS calculé sur l'écart type des mesures combiné à des hypothèses empiriques (constellation des satellites, conditions ambiantes...).

Réseau lel@ : réseau de 8 antennes GNSS réparties sur l'ensemble de l'île de La Réunion et permettant un positionnement centimétrique en temps réel.

GLONASS : système de positionnement par satellite d'origine Russe. Il a été opérationnel de 1996 à 1999, puis il l'est de nouveau en 2010.

Fichier RINEX (Receiver Independant EXchange Format) : format de fichier permettant l'échange de données d'observation satellitaire indépendamment du récepteur utilisé.

Fichier GEODB (GEODataBase) : format de fichier de données d'observations satellitaires issues des récepteurs Leica 500.

1. Introduction

La Réunion est une île sujette à de nombreux risques naturels tels que cyclones, pluies, crues, inondations, éboulements, glissements de terrain, coulées de lave... Le projet de recherche MvTerre-2 se concentre sur les mouvements de terrains de grande ampleur, et notamment la caractérisation du champ de déformation des glissements de terrain. Les domaines d'études où sont présents de tels phénomènes sont les trois cirques de la Réunion, à savoir Cilaos, Mafate et Salazie.

Lors du projet MvTerre-1, deux types de dispositifs avaient été mis en place pour mesurer et caractériser ces mouvements : un réseau de bornes géodésiques et un réseau d'antennes GPS permanentes. Ils ont confirmé la présence de glissements de terrain actifs, notamment dans le cirque de Salazie.

Cette première approche a permis de préciser et de corriger les connaissances sur ces mouvements (vitesses de déplacement, secteurs affectés). Cependant les données se sont avérées incomplètes et insuffisantes pour pouvoir approfondir l'analyse des glissements. Tout d'abord les tournées de mesures des bornes géodésiques étaient trop espacées pour pouvoir étudier finement les variations de position, et cela en fonction des événements potentiellement déclencheurs. Ensuite seulement deux stations GPS permanentes, permettant de mesurer une position en continu, étaient en fonctionnement (une sur chaque grand glissement, en plus de la station de référence à Mare à Vieille Place) ce qui est trop faible pour pouvoir appréhender l'emprise et la variabilité spatiale du phénomène.

Ainsi, en ce qui concerne la mesure des mouvements de terrain, le module 2 du projet MvTerre-2 se fixe les objectifs suivants :

- densifier le réseau de GPS permanents d'une part sur les deux grands glissements connus mais également sur d'autres mouvements à enjeux afin de suivre en continu les accélérations des déplacements.
- augmenter la fréquence des campagnes de relevé des bornes géodésiques afin d'établir une relation fine entre les variations de position et les événements potentiellement déclencheurs ;
- compléter le réseau de bornes dans des zones mal couvertes et stratégiques afin de tendre vers une homogénéité de la connaissance de la variabilité spatiale des déplacements ;

Suite au précédent rapport d'avancement (BRGM/RP-59019-FR¹) qui (i) présentait les nouveaux appareils et modes opératoires et (ii) dressait un bilan de l'état des réseaux et des mouvements de terrains observés, le présent *rapport final* (module 2) s'emploie à dresser une synthèse critique des mouvements de terrains constatés.

¹ Barbier B. & Aunay B. (2011) - Etat des lieux du suivi des réseaux géodésiques dans les cirques de la Réunion. Rapport final BRGM/RP-59019-FR. 147 p.

2. Réseau de bornes géodésiques

Ce chapitre dresse une synthèse critique des mouvements de terrains enregistrés sur les trois cirques de l'île de la Réunion. Il va également définir les perspectives de pérennisation de ces dispositifs.

Pour plus de détails sur la méthodologie du suivi ainsi que sur le traitement des données se référer au précédent rapport (Barbier & Aunay, 2011 - BRGM/RP-59019-FR).

2.1. PRESENTATION DU RESEAU ET DES DONNEES ASSOCIES

Depuis 2003, 222 repères géodésiques ont été installés sur les 3 cirques. 30 à Mafate, 49 à Cilaos, 142 à Salazie (Illustration 2). La répartition dépend des phénomènes identifiés et des enjeux associés. La très forte densité dans le cirque de Salazie, particulièrement sur les communes de Grand Ilet et Fond de Rond-Point s'explique par deux grands glissements de terrains qui présentent un risque majeur pour la population. A Cilaos, la densité est inférieure avec une répartition le long des axes routiers. Ceux-ci couvrent la majeure partie des zones à enjeu. A Mafate, le réseau est moins dense, la répartition s'organise autour des îlets. La faible densité est liée à la faiblesse des enjeux.

Initialement, lors de la première campagne de mesure en août 2003, on comptait 151 repères dont 138 installés pour l'étude et 13 déjà en place (borne IGN). Depuis, le réseau s'est largement étoffé notamment en 2007 avec l'installation de 16 bornes sur Mafate et Salazie ; en 2009 avec 2 bornes à Mafate ; en 2010 avec 21 spits (clou de géomètre) alimentant les réseaux de Cilaos et Salazie ; et en 2011 ou 32 bornes et spits complètent l'ensemble du réseau. Si le réseau s'est largement étoffé, certains repères ont disparus. Au total on en comptabilise 28. Historiquement, 15 en 2007, 8 en 2010, 4 en 2011 et 1 en 2012 (*annexe 1*).

Depuis 2003, 9 tournées ont été réalisées auxquels s'ajoutent, en complément, 7 tournées 'partielles' (toutes les bornes ne sont pas levées) (Illustration 1). Leur périodicité est très variable. Ce n'est qu'à partir de 2010 que les dates de tournées deviennent plus régulières à raison de 2 par an les mois qui précèdent et terminent la saison des pluies. C'est également en 2010 que le matériel GPS a été renouvelé. L'ancien système GPS *Leica 500* a été remplacé par le système GNSS *Leica 1200*. Ce système bénéficie d'une acquisition des données plus rapide et d'une précision améliorée car plus de satellite sont observés simultanément.

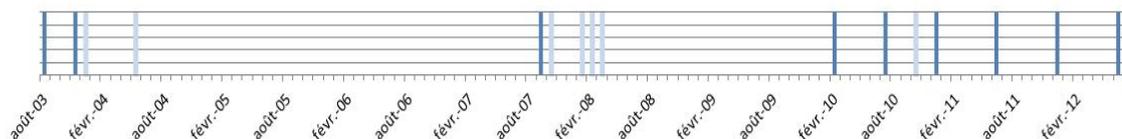


Illustration 1 : chronologie des campagnes de mesure. En bleu foncé, les 9 tournées complètes ; en bleu clair, les 7 tournées 'partielles'.

Pour une exploitation optimale du jeu de données, différents paramètres sont calculés : déplacement planimétrique, altimétrique, tridimensionnel entre deux mesures consécutives - déplacement planimétrique, altimétrique, tridimensionnel cumulé depuis la première mesure - vitesse planimétrique, tridimensionnelle - orientation et inclinaison du vecteur déplacement - durée des périodes entre deux mesures et nombre de mesures par borne (annexe 2).

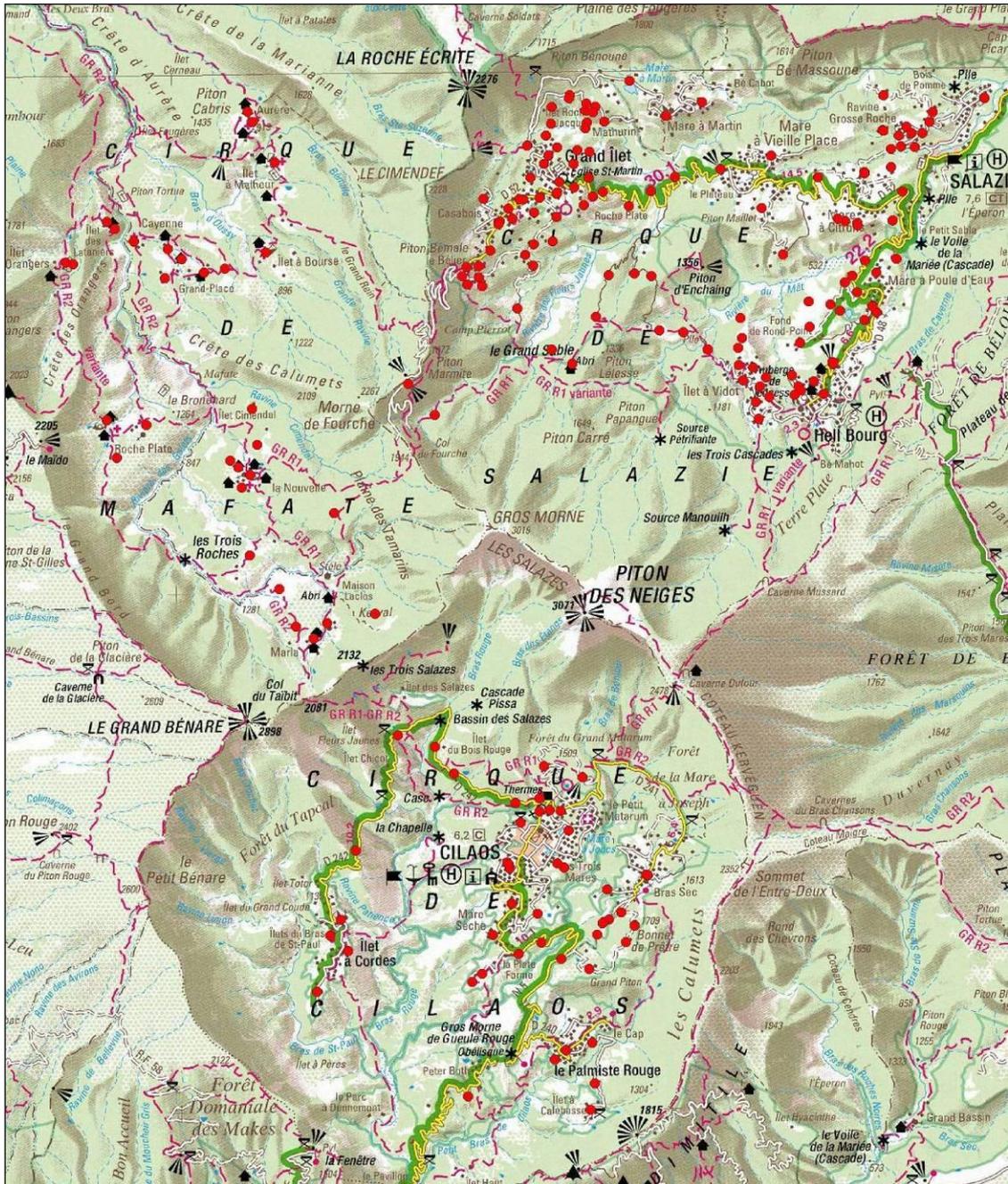


Illustration 2 : réseau géodésique des trois cirques de la Réunion.

Par ailleurs, l'exploitation des données est contrainte par l'évolution du réseau dans le temps. La création de nouveaux repères ainsi que la disparition de certains d'entre eux font que les séries de mesures sont bien souvent discontinues et/ou interrompues. Lors de l'analyse, cela conduit à faire un compromis entre (i) une exploitation

exhaustive des données (chaque borne donne un déplacement mais sur des périodes non synchrones) et (ii) une exploitation non exhaustive mais sur une période synchrone.

Pour prétendre réaliser une synthèse critique des données il convient d'en analyser la globalité. Ainsi, on retient une exploitation exhaustive avec une analyse détaillée pour chaque borne géodésique (*annexe 3*).

2.2. CONTROLE DE LA QUALITE DU POSITIONNEMENT GPS

Les deux dernières campagnes de mesures des bornes (T15 : déc. 2011 et T16 : juin 2012) montrent que chaque mesure présente des spécificités : (i) le relief et la végétation créent des effets de masque propre à chaque site et (ii) les enregistrements qui moyennent 4 mesures en temps réel produisent un 'instantané' des paramètres influençant la mesure GPS telles que la géométrie de la constellation satellitaire et l'activité ionosphérique. Ces derniers sont propres à chaque mesure. Pour contrôler les variations de précision de chaque enregistrement, le GPS dispose d'un système de contrôle interne propre à *Leica-Geosystems*, un indice *CQ* (*Coördynate Quality*) donne une estimation de la précision planimétrique (CQ2D) et tridimensionnelle (CQ3D).

Dans l'ensemble, l'estimation de précision annoncée est élevée. Alors que le *réseau Le/@* annonce une précision de l'ordre de 1 à 2 cm en planimétrie et 5 cm en altimétrie, les moyennes des CQ sont bien inférieures à ces valeurs (Tableau 2 et Illustration 3). Les histogrammes (Illustration 4) montrent que la répartition suit une logique décroissante : la quantité des mesures diminue quand l'imprécision augmente. D'ailleurs, pour chaque variables, une minorité des données se situent au-dessus du seuil d'imprécision de 1 cm (8.5% de CQ2D-T15 ; 14.2% de CQ2D-T16 ; 21.3% de CQ3D-T15 et 31% de CQ3D-T16). Les valeurs qui approchent la précision annoncée du *réseau Le/@* sont rares. Pour CQ2D-T15, aucune valeur n'excède 2 cm ; pour CQ2D-T16, 2 valeurs excèdent 2 cm ; pour CQ3D-T15 et CQ3D-T16 les valeurs n'excèdent pas 5 cm. Les plus élevées sont à 4.8 cm. Sur le plan spatial, aucun secteur ne semble spécifiquement touché, de manière récurrente, par une forte imprécision (Illustration 4). On peut en déduire que sur chacun des trois cirques, l'environnement (effet de masque dû aux montagnes et à la végétation) n'est pas une contrainte rédhibitoire à la mesures GPS.

On constate une perte de précision en 3D sensible mais pas excessive pour la plupart des valeurs. La précision moyenne de la tournée T16 est de 0.54 cm en 2D contre 0.82 cm en 3D. Pour la tournée T15, elle est de 0.36 cm en 2D contre 0.64 cm en 3D

Pour conclure, le CQ est un indicateur optimiste sur lequel il est hasardeux de s'appuyer.

	<i>T16 - CQ2D</i>	<i>T16 - CQ3D</i>	<i>T15 - CQ2D</i>	<i>T15 - CQ3D</i>
<i>moyenne</i>	0.54	0.82	0.36	0.64
<i>mini</i>	0.10	0.00	0.00	0.00
<i>premier quartile</i>	0.20	0.20	0.20	0.20
<i>quartile moyen</i>	0.40	0.40	0.20	0.30
<i>troisième quartile</i>	0.80	1.30	0.30	0.70
<i>max</i>	2.60	4.80	1.90	4.80

Tableau 2 : distribution des CQ2D et 3D pour les tournées n°15 et 16. Les données sont exprimées en cm. La population de T15 est de 188, celle de T16 est de 180.

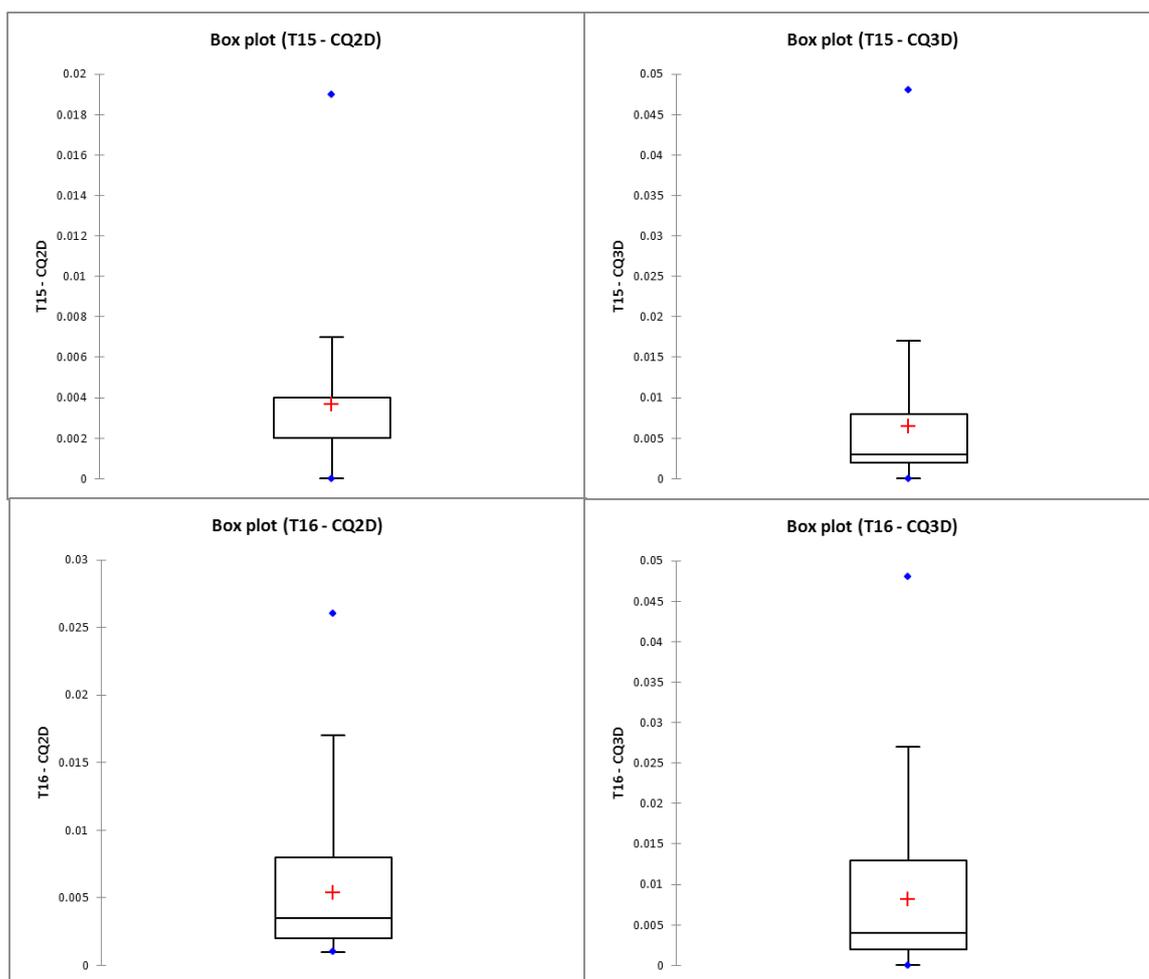


Illustration 3 : box plots des CQ2D et 3D pour les tournées n°15 et 16. Les données sont exprimées en cm.

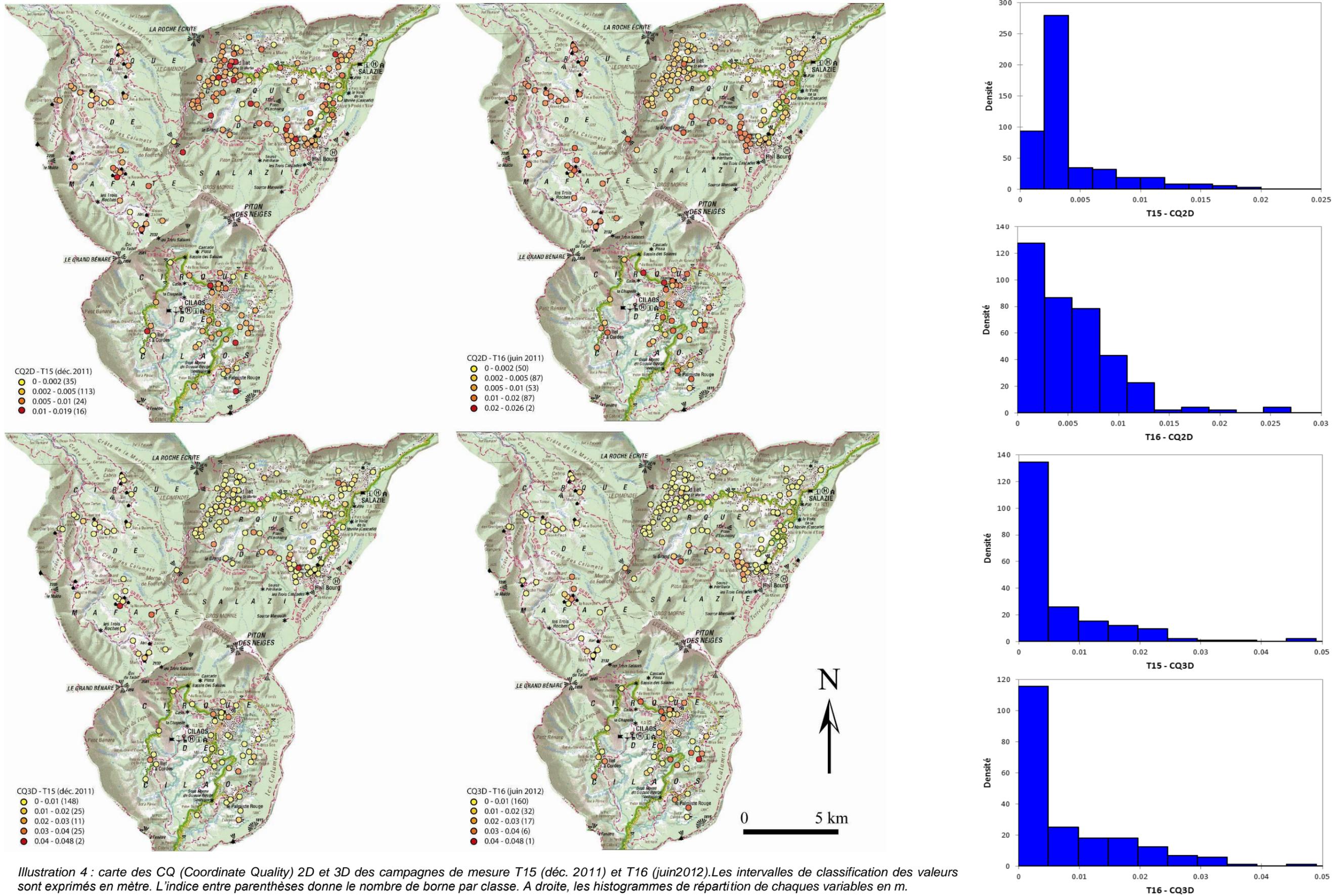


Illustration 4 : carte des CQ (Coordinate Quality) 2D et 3D des campagnes de mesure T15 (déc. 2011) et T16 (juin 2012). Les intervalles de classification des valeurs sont exprimés en mètre. L'indice entre parenthèses donne le nombre de borne par classe. A droite, les histogrammes de répartition de chaque variable en m.

2.3. ANALYSE CRITIQUE DES DEPLACEMENTS

Le positionnement GPS variable dans le temps et l'espace trouve ses limites lorsque l'on mesure des déplacements inférieurs à sa précision réelle. De fait, il est nécessaire de définir si les déplacements mesurés sont une réalité ou un artefact.

2.3.1. Déplacement planimétrique

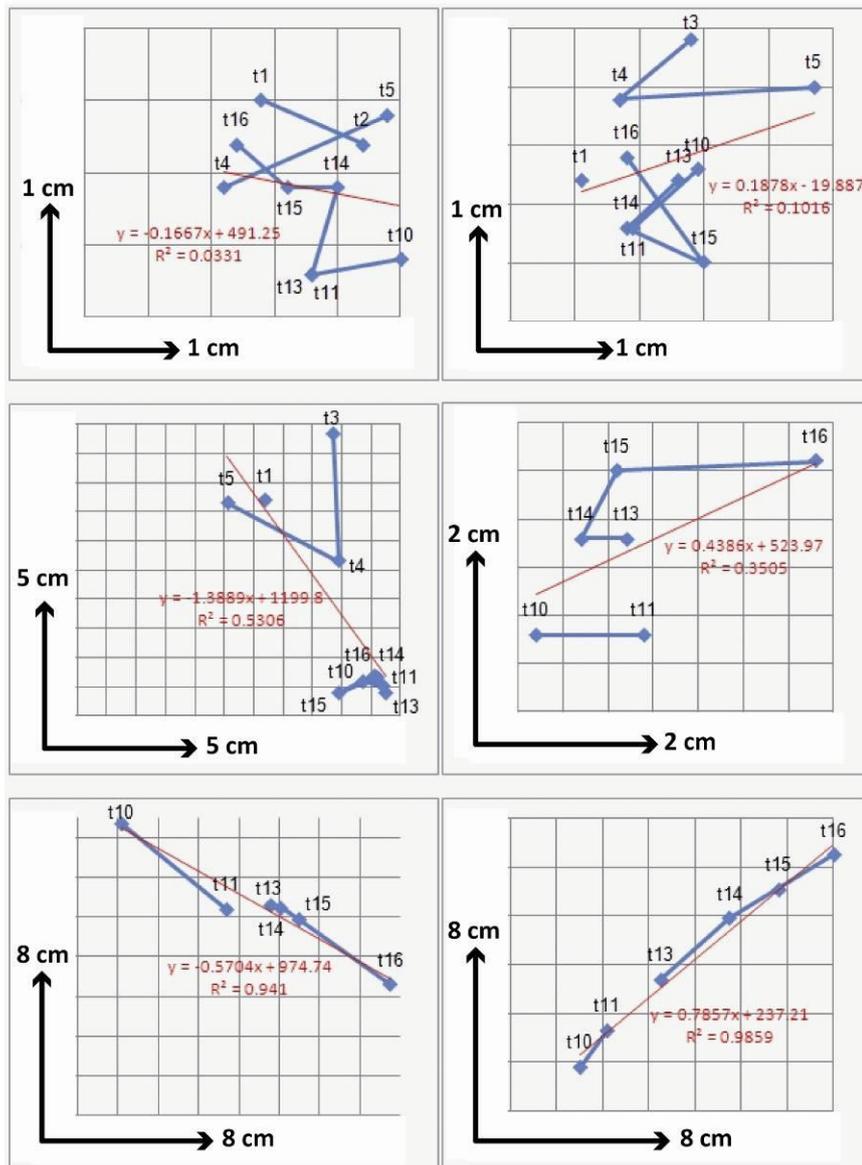
Pour apprécier finement les déplacements planimétriques, on procède à une classification fondée sur deux critères : (i) une qualification de l'ordre de grandeur des déplacements associé à (ii) un indice de crédibilité des chroniques.

Le premier critère, basé sur une analyse 'visuelle' des séries de position permet de différencier les déplacements planimétriques réels de ceux qui sont nuls ou trop faibles pour être mesurés par la technique GPS. On concentre notre analyse sur les déplacements planimétriques sans prendre en compte la composante altimétrique qui est trop imprécise. Un graphe orthonormé présentant la position des bornes lors de chaque campagne, associé à une droite de régression linéaire illustrent le déplacement (Illustration 5 et *annexe 4*). En visualisant, au cas par cas les chroniques, des indications permettent d'en classer la majorité. La discrimination se base sur la magnitude du déplacement et la tendance de la série temporelle. Les mouvements de faibles amplitudes ou erratiques relèvent d'artefacts de mesure. Ainsi, on distingue les déplacements avérés de ceux produits par l'imprécision GPS. Une partie des séries reste soumise à incertitude. On observe une tendance indiquant un possible déplacement. Ce dernier pourra être précisé lors de futures campagnes et/ou lors d'évènement cyclonique important.

On obtient 3 ordres de grandeur : **1** => absence de déplacement ou déplacement trop lent pour être détecté par GPS ; **2** => déplacement supposé ; **3** => déplacement avéré.

Le second critère permet de contrôler une série de mesures en fonction du nombre d'observations. En effet, plus le nombre d'enregistrement est important plus le déplacement est crédible. Deux positions sont nécessaires pour mesurer un déplacement mais insuffisantes pour apprécier s'il est une réalité ou un artefact. On opte pour un minimum de 5 mesures. Ce minimum requis est volontairement élevé. En considérant le caractère aléatoire de la mesure GPS, 5 mesures sont nécessaires pour visualiser si l'une d'entre elle a une imprécision supérieure à l'ensemble de la série.

On obtient ainsi trois indices : **A** => moins de 2 mesures par série, les bornes peuvent être exclues du jeu de données ; **B** => de 2 à 4 mesures, le déplacement peut être appréhendé avec prudence, une analyse détaillée (accélération, saisonnalité) n'est pas envisageable ; **C** => 5 mesures et plus, le déplacement peut être analysé en détail avec certaines précautions.



1 => repères dont le déplacement est nul ou trop lent pour être mesuré par GPS. Les R^2 des deux droites de régression sont très faibles. La succession des points de t1 à t16 n'esquisse aucune tendance de déplacement..

2 => repères dont le déplacement est supposé. Les R^2 des deux droites de régression sont trop faibles pour être significatifs. Cependant, la succession des points esquisse une tendance vers un déplacement qui sera de ~ 10 cm en direction SSE pour le graphe de gauche et de ~ 4 cm en direction ONO pour le graphe de droite.

3 => repères dont le déplacement est avéré. Les R^2 des droites de régression sont proches de 1. La succession des points esquisse un déplacement avec certitude.

Illustration 5 : graphes orthonormés présentant six chroniques de position de repères géodésiques. Les points numérotés de t1 à t16 correspondent à la chronologie des 16 tournées avec t1 = août 2003 et t16 = juin 2012. Les unités des graphes sont exprimées en mètre.

2.3.2. Tassement

Le tassement est une grandeur difficilement quantifiable par GPS lorsqu'elle doit être de précision centimétrique.

La méthode la plus adaptée reste celle décrite ultérieurement lors de la classification des déplacements planimétriques. Cependant, pour une analyse fiable, il est essentiel de simplifier la qualification de l'ordre de grandeur des déplacements. On opte pour deux classes : **0** => tassement nul ou non mesurable par GPS ; **1** => tassement avéré.

On classe en observant les chroniques des déplacements verticaux et les graphes associés (*annexe 4*). Ainsi, on détermine la classe **1** sur deux critères : (i) le tassement des chroniques doit être progressif et (ii) leur hauteur ne doit pas être inférieure à 5 cm, en dessous la chronique de tassement est susceptible de ne pas être significative. Les bornes n'appartenant pas à ces critères composent la classe **0**. On ajoute que dans certains cas, le tassement peut-être positif (remontée de terrain). Ce phénomène, non rencontré dans le cas de cette étude, est causé par (i) la topographie sous-jacente au glissement et (ii) une localisation dans la partie inférieure de glissement rotationnel.

2.4. DETERMINATION DE L'INCERTITUDE DES MESURES

L'analyse critique des déplacements permet l'identification des éléments géodésiques 'immobiles'. Par suite, le calcul des écarts de positionnement de ces éléments aboutit la détermination d'une valeur d'incertitude à appliquer à nos mesures.

2.4.1. Incertitude de positionnement

L'erreur systématique relative au positionnement GPS est une grandeur que seule la répétabilité des mesures permet de quantifier. C'est une erreur dite 'accidentelle', qui n'a pas de signe et dont la qualité de l'estimation dépend de l'écart type (σ) et donc de la grandeur du jeu de données. Ce dernier compte 101 éléments géodésiques 'immobiles' répartis sur les trois cirques avec une réitération d'environ 6 mesures par éléments.

$$\sigma = \sqrt{(\sum e^2) \div (n - 1)} \quad \text{avec } e : \text{écart par rapport à la moyenne}$$

$$\text{et } n : \text{nombre de mesure}$$

Statistique	DX	DY	DZ
Observations	602	602	602
Minimum	-0.032	-0.037	-0.208
Maximum	0.054	0.051	0.446
1er Quartile	-0.006	-0.005	-0.019
Médiane	0.000	0.000	0.001
3ème Quartile	0.005	0.006	0.021
Moyenne	0.000	0.000	0.000
Variance (n-1)	0.000	0.000	0.002
Ecart-type (n-1)	0.009	0.010	0.041

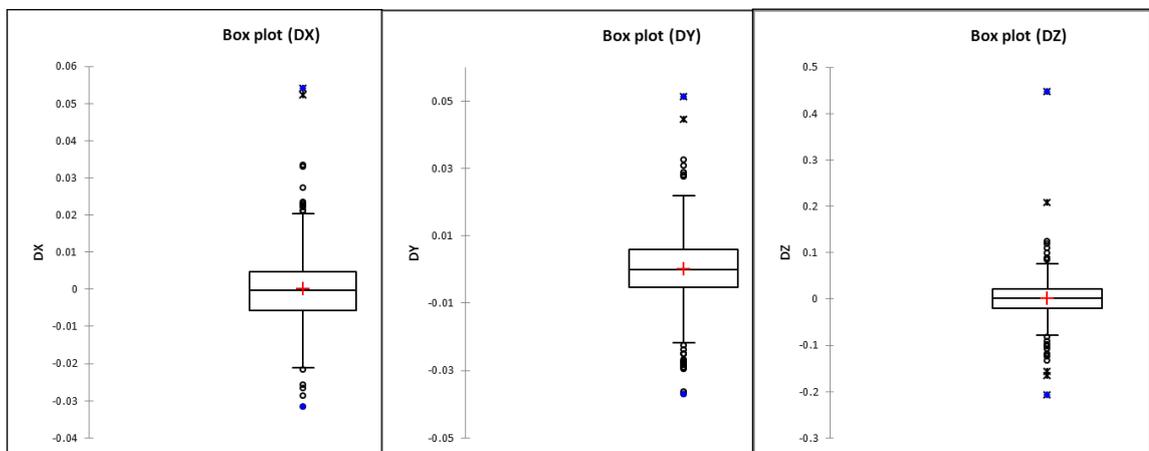


Illustration 6 : statistiques, descriptives des variables DX, DY et DZ qui sont les mesures des écarts de position des éléments géodésiques 'immobiles' selon les axes X, Y et Z.

	Salazie (n=224)			Cilaos (n=203)			Mafate (n=174)			Trois cirques (n=602)		
	X (+/- m)	Y (+/- m)	Z (+/- m)	X (+/- m)	Y (+/- m)	Z (+/- m)	X (+/- m)	Y (+/- m)	Z (+/- m)	X (+/- m)	Y (+/- m)	Z (+/- m)
Ecart type (σ)	0.008	0.008	0.032	0.010	0.012	0.031	0.010	0.010	0.058	0.009	0.010	0.041
Incertitude à 95%	0.016	0.015	0.063	0.019	0.024	0.062	0.020	0.021	0.115	0.018	0.020	0.081

Tableau 3: écart type et incertitude a 95% relatif au données du réseau de bornes géodésiques. En grisée, les valeurs retenues pour l'estimation de l'incertitude de déplacement.

L'écart type et les incertitudes à 95% différents d'un cirque à l'autre. La précision des mesures apparaît meilleur dans le cirques de Salazie (Tableau 3) ce qui est cohérent avec notre méthode de positionnement GPS : Salazie (Mare à Vieille Place) heberge l'antenne GPS fixe qui sert de pivot a nos mesures. De fait, les distances des lignes de base sont moindres à Salazie et le calcul de positionnement est de meilleur qualité.

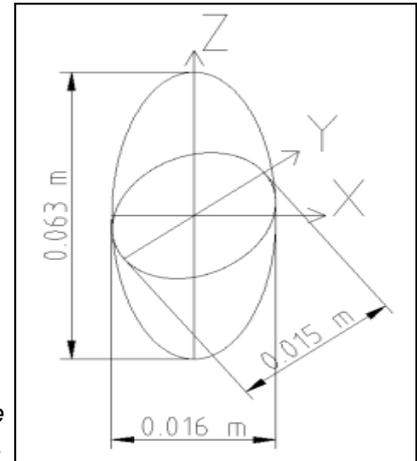


Illustration 7 : sphère d'incertitude de positionnement dans le cirque de Salazie à 95% (2σ).

2.4.2. Incertitude sur les différentes variables du déplacement

L'objet de l'analyse est de déterminer pour chaque variables (déplacement plan et 3D, tassement vertical, orientation, pendage et vitesse) l'incertitude qui combine les incertitudes le positionnement du point origine (A) et du point d'arrivé (B).

Dans un repère orthonormé, les incertitudes incertitudes en X, Y et Z se cumulent par la loi d'accumulation :

$$\text{Incertitude} = \sqrt{a^2 + b^2} \text{ avec } a \text{ et } b \text{ valeurs d'incertitudes à 95 \% (2}\sigma\text{)}.$$

En exemple, dans le cirque de Salazie, les incertitudes en X, Y et Z sont :

$$\text{Incertitude } X = \sqrt{0.016^2 + 0.016^2} = \mathbf{0.0226 \text{ m}}$$

$$\text{Incertitude } Y = \sqrt{0.015^2 + 0.015^2} = \mathbf{0.0212 \text{ m}}$$

$$\text{Incertitude } Z = \sqrt{0.063^2 + 0.063^2} = \mathbf{0.0891 \text{ m}}$$

Par suite, la loi de propagation des incertitudes,

$$(\Delta f)^2 = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 (\Delta x_i)^2$$

permet de calculer l'incertitudes d'une combinaison et par conséquent, l'incertitude des différentes variables dont les fonctions sont :

- Incertitude sur le déplacement plan : $f(a,b) = \sqrt{a^2 + b^2}$
- Incertitude sur le déplacement 3D : $f(c,d) = \sqrt{c^2 + d^2}$
- Incertitude sur le pendage : $f(d,c) = \arctan\left(\frac{d}{c}\right)$
- Incertitude sur l'orientation : $f(a,b) = \arctan\left(\frac{a}{b}\right)$

Avec a, b, c et d correspondant aux distance de déplacement entre le point d'origine (A) et le point d'arrivé (B). Dans le repère orthonormé à 3 dimensions (O ; x, y, z), a est la distance AB selon l'axe x ; b est la distance AB selon l'axe y ; c est la distance AB dans le plan (O, x, y) et d est la distance AB selon l'axe z.

Les résultats sont présentés dans l'annexe 7.

2.5. PRESENTATION DES RESULTATS

Les résultats sont présentés sous forme de carte (illustration 9 ; 10 ; 11). Ces cartes donnent les valeurs des vitesses des déplacements planimétriques mesurées pour chaque élément géodésique et sur la plus longue période d'investigation. Sur les cartes, chaque éléments s'accompagnent d'un indice, allant de 92 à 3227, et correspondant au nombre de jours qui a permis le calcul de la vitesse de déplacement. En se référant au tableau en bas de chaque carte l'indice donne le début et la fin de la période investiguée. En exemple, une flèche sur la carte accompagnée de l'indice 1370 correspond à un calcul de vitesse de déplacement planimétrique sur une période de 1370 jours qui, d'après le tableau, démarre en mars 2008 et se termine en décembre 2011.

L'incertitude, déterminée précédemment, est présenté lorsqu'elle dépasse 10% de la valeur de déplacement mesuré et qu'elle est supérieur à 2 cm. Pour plus détail sur l'incertitude des mesures se reporter à l'annexe 7

2.5.1. Réseau du cirque de Cilaos

On observe peu de déplacements sur l'ensemble du cirque (Illustration 12). Trois secteurs sont marqués par des déplacements significatifs : (i) Le Cap Sylvestre avec l'ilet du Bonnet Carré (CI08 – CI26 – CI28) ; (ii) la route reliant le Palmiste Rouge et l'ilet à Calebasse (CI23) ; (iii) à proximité de la berge ouest de la Mare à Jonc dans Cilaos (CI04).

En dehors de ces secteurs pas ou peu de mouvements sont observés. Quatre bornes ont des déplacements supposés. Trois d'entre elles (CI12b – CI19 – CI15) sont voisines de bornes dont le déplacement est nul. De plus, la crédibilité des séries de données est très faible, elle compte seulement deux mesures. De fait, les

déplacements enregistrés sur ces bornes sont avec quasi-certitude des artefacts. Seul CI60, isolé sur la route D242 au niveau de l'Îlet Dijoux montre, avec trois mesures de juin 2011 à juin 2012, un possible déplacement de l'ordre de 3 à 4 cm/an. Cependant, il est contraire à la pente et devra donc à être confirmé lors de futures campagnes.

Dans le détail, les secteurs concernés par des déplacements sont rares.

- Secteur CI08 – CI26 – CI28 (Illustration 8) : on note qu'un déplacement s'est produit sur la période novembre 2003 – septembre 2007 qui concentre les deux principaux événements pluvieux Diwa (2006) et Gamède (2007). En dehors de cette période on observe une relative immobilité pour CI08 et CI28. CI26 manque de mesure pour être interprétée ainsi.

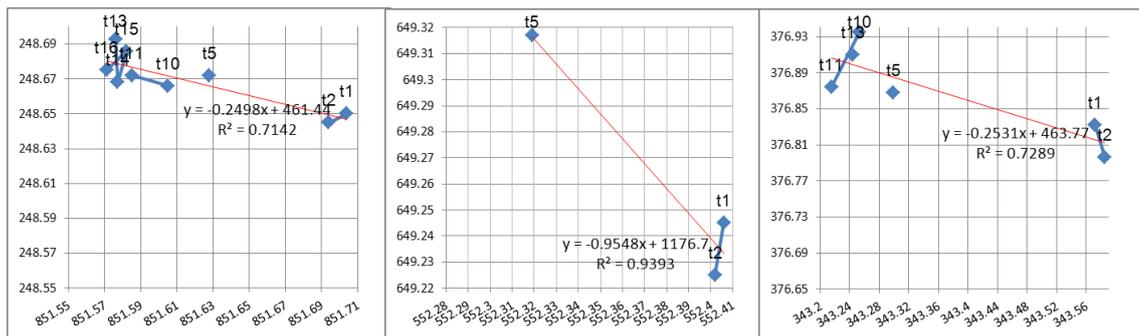


Illustration 8 : graphes orthonormés des chroniques, de gauche à droite, CI08 – CI26 – CI28.

- Secteur CI23 et CI04 : on retrouve des déplacements similaires à ceux observés pour CI08 et CI28. Un mouvement est observé sur la période de novembre 2003 à septembre 2007.

Peu de déplacements sont à noter sur le cirque de Cilaos. Ceux observés en bordure est du cirque se sont produit lors des deux principaux événements pluvieux (Diwa et Gamède) de ces dix dernières années. En dehors de cet intervalle de temps on observe une quasi-absence de déplacement sur l'ensemble du cirque.

Il est important de noter que les mesures sur le cirque de Cilaos mettent en évidence la relation pluies / déplacements. Si en l'absence de fortes pluies les mouvements de terrains sont quasi-absents, il est très probable que les derniers épisodes pluvieux intenses en soient à l'origine.

2.5.2. Réseau du cirque de Mafate

Aucun déplacement significatif n'a été enregistré depuis août 2003 sur le cirque de Mafate. Seules les bornes MA15 et MA23 ont des déplacements supposés (Illustration 13).

Plus en détail, les mesures postérieures à l'acquisition du nouveau système GNSS Leica 1200² permettent de détecter, avec une part d'incertitude, des mouvements d'ordre centimétriques à pluricentimétriques à Marla, Roche Plate et îlet des Lataniers.

En planimétrie (Tableau 4 et Illustration 10), on observe quatre éléments dont les déplacements dépassent 4 cm : MA08 à Marla, MA11 à Roche Plate, MA14 et MA15 à îlet des Lataniers. Dix ont des déplacements compris entre 2 et 4 cm et neuf ont des déplacements inférieurs à 2 cm.

Globalement, même si aucun déplacement de terrain ne peut être confirmé avec certitude on observe que la série de mesure de MA08 à Marla (Illustration 9) esquisse assez nettement un glissement en direction du sud-ouest et vers le fond de la ravine. Les 5.4 cm enregistré depuis février 2010 s'établissent en deux temps. De février 2010 (t10) à juillet 2010 (t11) on enregistre 2.7 cm de déplacement. De décembre 2011 (t15) à juin 2012 (t16) on enregistre 2 cm de déplacement. En dehors de ces périodes, la borne ne semble pas s'être déplacée. La série de mesure de MA11 à Roche Plate (Illustration 9) montre également un mouvement de 4.1 cm uniquement de février 2010 (t10) à juillet 2010 (t11). Après cette période la borne enregistre des déplacements quasi-nul. De la même manière, les déplacements de MA14 et MA15 à îlet des Lataniers (Illustration 9) subissent le même phénomène. On enregistre, respectivement, 4.8 et 4.7 cm de février 2010 (t10) à juillet 2010 (t11).

On identifie trois zones de glissement supposées : îlet des Lataniers, Roche Plate et Marla avec des mouvements produits lors des saisons des pluies 2010 et 2012 (les mesures antérieures réalisées avec le système GPS Leica 500 ne permettent pas de mettre en évidence de mouvement). Ces mouvements sont certes de faible amplitude mais les directions de déplacements sont cohérentes avec la topographie et les déplacements se produisent en saisons des pluies.

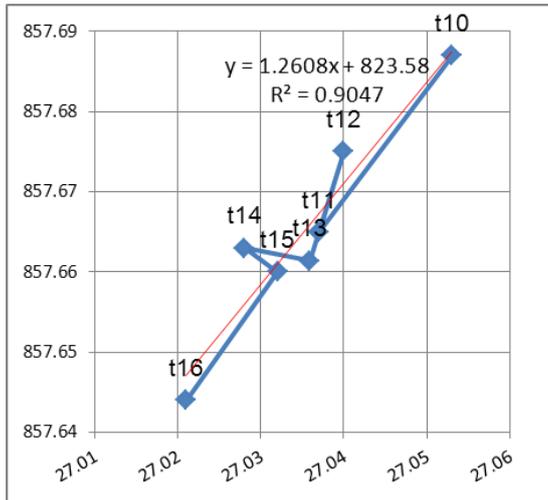
Enfin, la faiblesse des observations de mouvement de terrain à Mafate reste à relativiser. D'une part, le réseau géodésique reste peu dense donc on n'exclut pas un risque de non diagnostique lié à un échantillonnage limité. En comparaison, on compte presque deux fois plus de bornes à Cilaos et cinq fois plus à Salazie. D'autre part, il n'est pas exclu que des évènements pluvieux intenses puissent réactiver d'anciens glissements.

² MvTerre-1 (2003-2009) : matériel GPS Leica 500 – MvTerre-2 (2010-2013) : matériel GNSS Leica 1200.

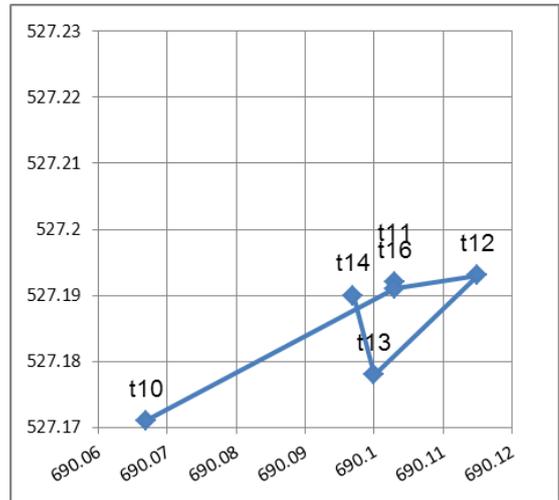
Bornes	févr.-10	juil.-10	oct.-10	déc.-10	juin-11	déc.-11	juin-12
GP1	0	0.011	0.012	0.023	0.007	0.006	0.012
GP2	0	0.035	0.033	0.019	0.030	0.043	0.022
GP3	0	0.024	0.026	0.014	0.034	0.022	0.026
GP4	0	0.008	0.015	0.016	0.004	0.017	0.021
IGN0812	0	0.037	0.033	0.032	0.012	0.010	0.034
IGN0813	0	0.022	0.025	0.042	0.024	0.028	0.006
IGN0814	0	0.003	0.010	0.006	0.016	0.012	0.012
IGN1518	0	0.003	0.019	0.008	0.001	0.012	0.009
MA01	0	0.011	0.022	0.017	0.024	0.025	0.016
MA02	0	0.018	0.026	0.029	0.023	0.016	0.038
MA03	0	0.017	0.029	0.018	0.023	0.009	0.025
MA04	0	0.031	0.035	0.033	0.034	0.034	0.034
MA05	0	0.006	0.018	0.031	0.017	0.022	0.020
MA06	0	0.004	0.014	0.021	0.018	0.002	0.026
MA07	0	0.025	0.013	0.022	0.017	0.014	0.014
MA08	0	0.027	0.018	0.031	0.035	0.034	0.054
MA09		0	0.013	0.041	0.008	0.019	0.012
MA10	0	0.012	0.013	0.015	0.013		0.010
MA11	0	0.041	0.053	0.034	0.036		0.042
MA13	0	0.005	0.001	0.041	0.016	0.006	0.010
MA14	0	0.048	0.042	0.048	0.042	0.050	0.049
MA15	0	0.047	0.027	0.043	0.056	0.038	0.047
MA16	0	0.028	0.019	0.013	0.023	0.022	0.028
MA17	0	0.022	0.027	0.021	0.038	0.018	0.025
MA21					0	0.026	0.009
MA22					0	0.025	0.017
MA23					0	0.005	0.034
MA24					0	0.011	0.002
MA25					0	0.006	0.007
MA26					0	0.024	0.014

Tableau 4 : déplacements planimétriques cumulés depuis février 2010. Le curseur bleu donne un aperçu des valeurs de déplacements,

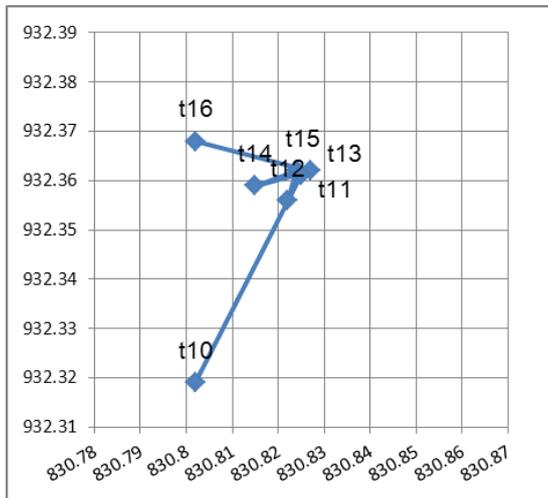
MA08 Marla



MA11 Roche Plate



MA14 Ilet des Lataniers



MA15 Ilet des Lataniers

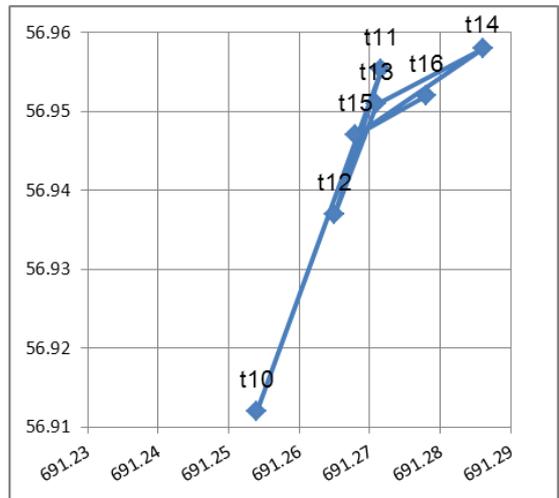


Illustration 9 : graphes orthonormés, d'échelle centimétrique (chaque carré indique une surface de 1 cm²), présentant les séries de positions des bornes : MA08, MA11, MA14 et MA15. Les étiquettes t10 à t16 se réfèrent aux tournées.

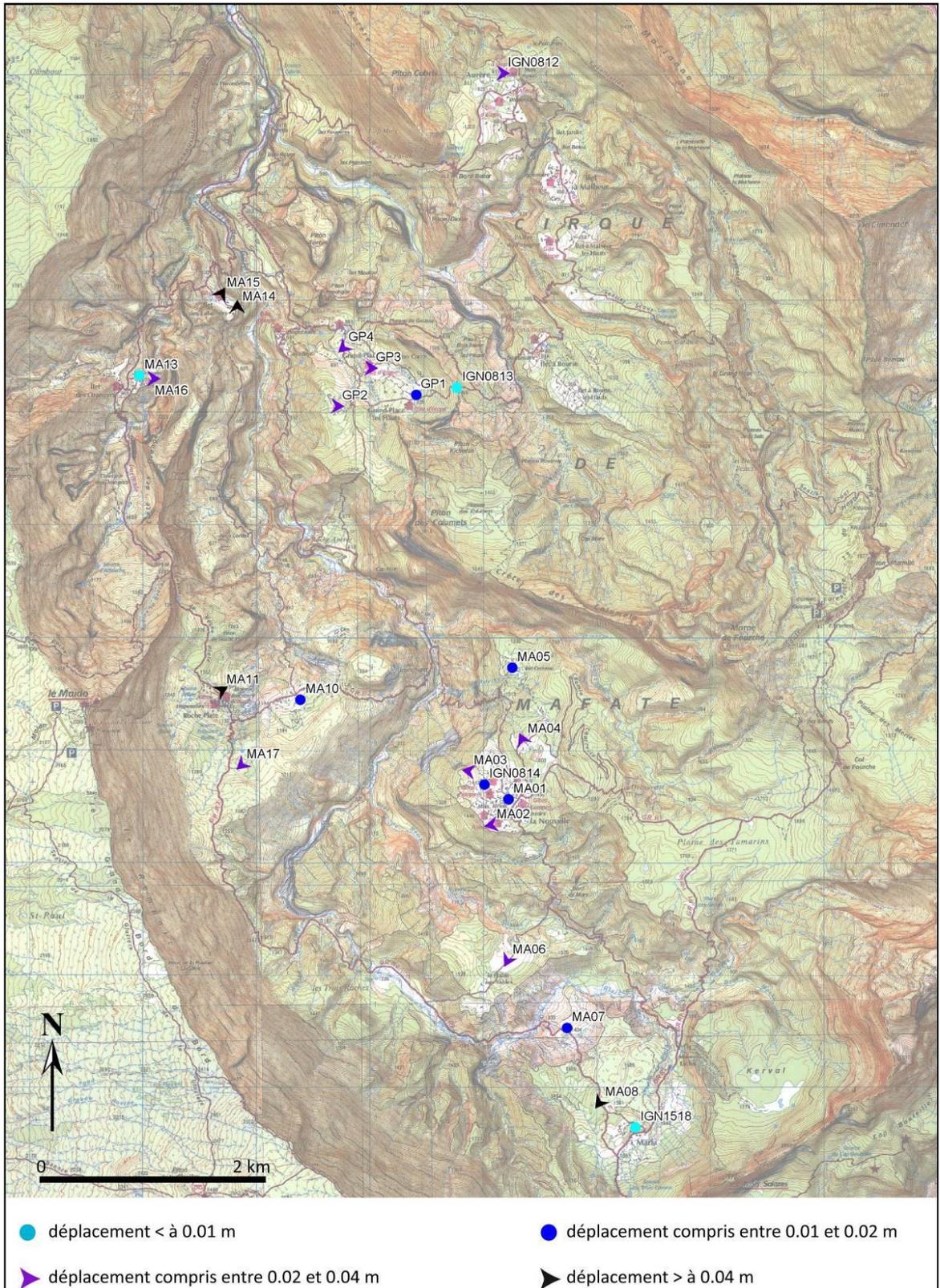


Illustration 10 : déplacement planimétrique des bornes de Mafate pour la période février 2010/juillet 2012. Pour les déplacements inférieurs à 2 cm, l'information de direction n'est pas prise en compte pour éviter les interprétations non significatives. En raison de la faiblesse des déplacements enregistrés, les mesures antérieures à 2010 (date d'acquisition du nouveau matériel GNSS Leica 1200) ne sont pas représentées sur la carte.

2.5.3. Réseau du cirque de Salazie

Des trois cirques, Salazie est de loin l'objet d'étude le plus remarquable dans l'analyse des mouvements des terrains de grande ampleur (Illustration 14). Plusieurs glissements actifs sont identifiés ce qui explique la densité du réseau ainsi que sa répartition géographique ciblée sur les secteurs reconnus comme actifs.

Actuellement, on identifie sept glissements (Illustration 14). Les deux principaux sont ceux de *Grand Ilet* et de *Fond de Rond-Point*.

Dans le détail, celui de **Fond de Rond-Point** se déplace vers le nord de manière homogène à des vitesses variant de 0.6 à 1 m/an. Il se localise sur un 'plateau' bordé au nord-ouest par la rivière du Mât, à l'est par Mare à Poule d'Eau et au sud par Fond de Rond-Point.

Le glissement de **Grant Ilet** se déplace vers le nord-est à des vitesses variant de quelques cm à plus de 60 cm/an. Cette variation suit une logique d'augmentation depuis la tête du glissement au sud vers le pied au nord. Les limites sont assez floues notamment sur la partie supérieure. La tête du glissement semble délimitée par le pied du rempart du Cimendef. A l'opposé, le pied du glissement est limité au nord par la ravine Roche à Jacquot. A l'est, le glissement ne se propage pas jusqu'à la rivière des Fleurs Jaunes. Il s'arrête beaucoup plus haut : la borne SA135 (côte NGF 935) n'enregistre pas de déplacement alors qu'elle est à presque 250 m au-dessus du fond de la rivière des Fleurs Jaunes (côte NGF 670 m au niveau du pont de la route D52) (illustration 11).

Outre ces deux glissements majeurs, on retrouve le glissement d'**Ilet à Vidot** avec un déplacement vers le nord-nord-est et des vitesses variant de quelques cm à presque 0.2 m/an. Celui du **Bélier**, direction est-sud-est à moins de 0.1 m/an. Celui de **Mare à Goyave**, direction sud avec des vitesses supérieures sur la marge orientale : 0.1 contre 0.25 m/an. On observe également des directions qui ont tendance à diverger côté est pour la marge orientale et côté ouest pour la marge occidentale. Celui de **Maturin**, direction sud a des vitesses variables en fonction des secteurs qui semblent glisser indépendamment. C'est un secteur qui subit une très forte érosion régressive. Lors des cyclones Diwa et Gamède l'érosion régressive a progressé sur plusieurs dizaines de mètres (Illustration 11). Enfin, celui situé sur la route menant à Camp Pierrot, direction est et est-sud-est a des vitesses inférieures à 0.1 m/an.

En dehors de ces secteurs, on observe une relative stabilité des terrains. Quelques zones ont des déplacements relativement lents par rapport à l'ensemble des glissements actifs (entre 2 et 6 cm/an), notamment au pied sud-ouest du piton d'Enchaing, sur la bordure est de Grand Sable ainsi que sur la bordure sud de Mare à citrons.



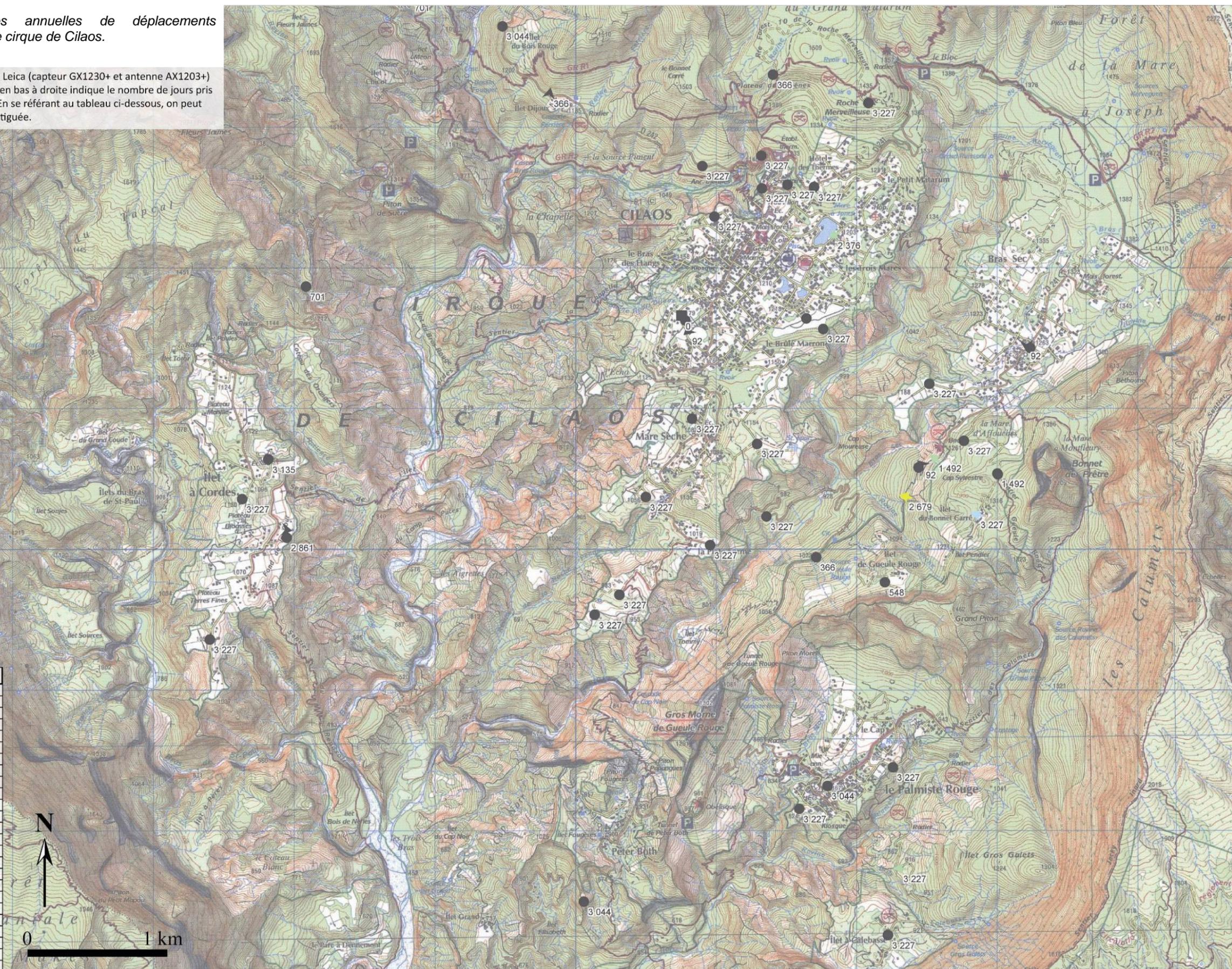
Illustration 11 : érosion régressive sur la rive gauche de la ravine Roche à Jacquot (secteur Maturin) après le passage des cyclones Diwa et Gamède. ©Google Earth

Illustration 12 : vitesses annuelles de déplacements planimétriques en m/an sur le cirque de Cilaos.

Mesures réalisées avec un GPS de type Leica (capteur GX1230+ et antenne AX1203+) en liaison avec le réseau Iel@. L'indice en bas à droite indique le nombre de jours pris en compte dans la mesure de vitesse. En se référant au tableau ci-dessous, on peut également déterminer la période investiguée.

- Non disponible
- Absence de déplacement
- ▶ Déplacement supposé
- ➔ < 0.02
- ➔ 0.02 - 0.04
- ➔ 0.04 - 0.06

Date début	Date fin	Période (jours)
août-03	nov.-03	92
août-03	déc.-03	122
sept.-07	mars-08	182
déc.-11	juin-12	183
août-03	mai-04	274
juin-11	juin-12	366
déc.-10	juin-12	548
juil.-10	juin-12	701
févr.-10	juin-12	851
mars-08	déc.-10	1005
mars-08	juin-11	1187
mars-08	déc.-11	1370
nov.-03	sept.-07	1400
août-03	sept.-07	1492
mars-08	juin-12	1553
nov.-03	mars-08	1582
oct.-07	juin-12	1705
sept.-07	juin-12	1735
août-03	févr.-10	2376
août-03	déc.-10	2679
août-03	juin-11	2861
août-03	déc.-11	3044
déc.-03	juin-12	3105
nov.-03	juin-12	3135
août-03	juin-12	3227



Mesures réalisées avec un GPS de type Leica (capteur GX1230+ et antenne AX1203+) en liaison avec le réseau lel@. L'indice en bas à droite indique le nombre de jours pris en compte dans la mesure de vitesse. En se référant au tableau ci-dessous, on peut également déterminer la période investiguée.

■ Non disponible ● Absence de déplacement ➤ Déplacement supposé

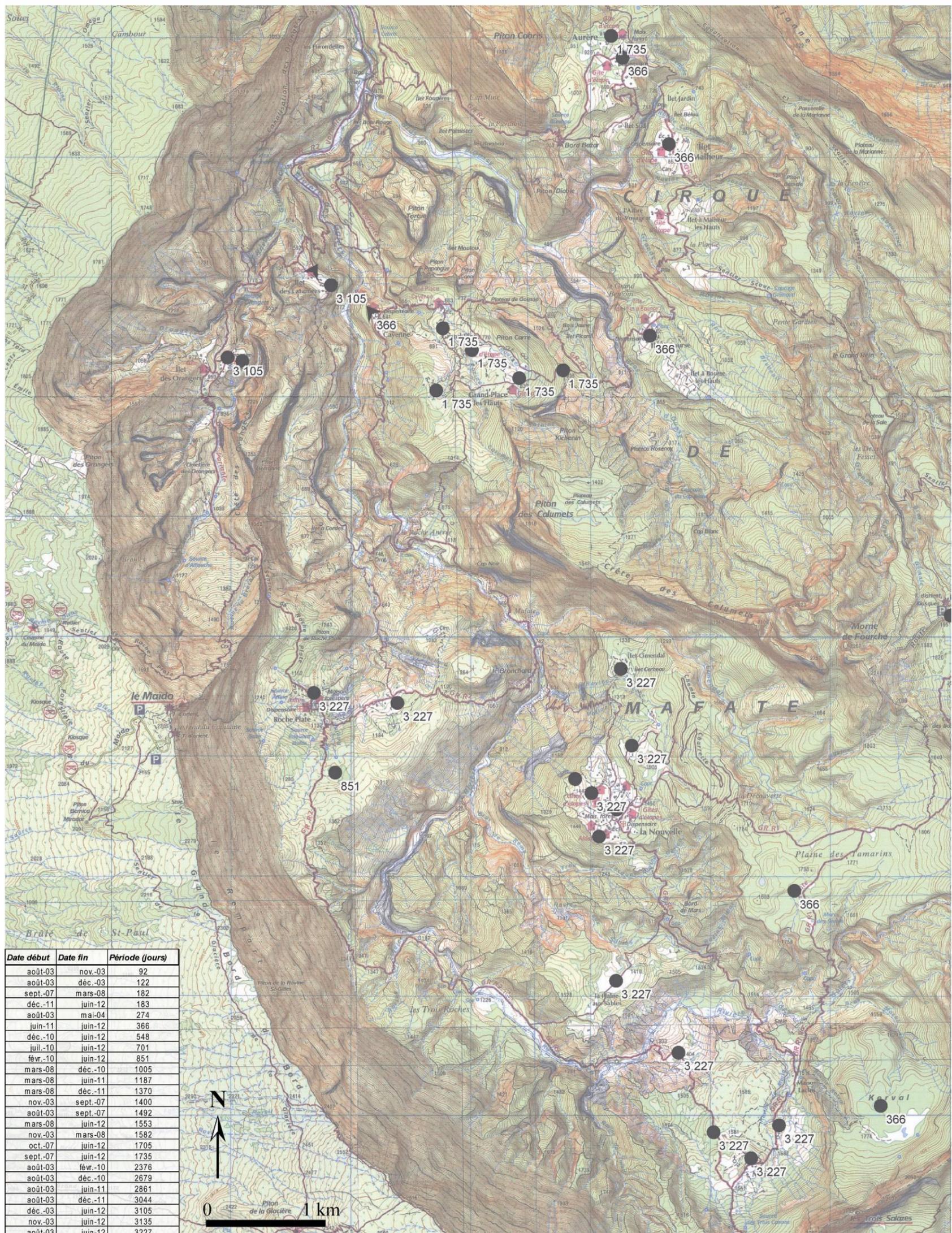
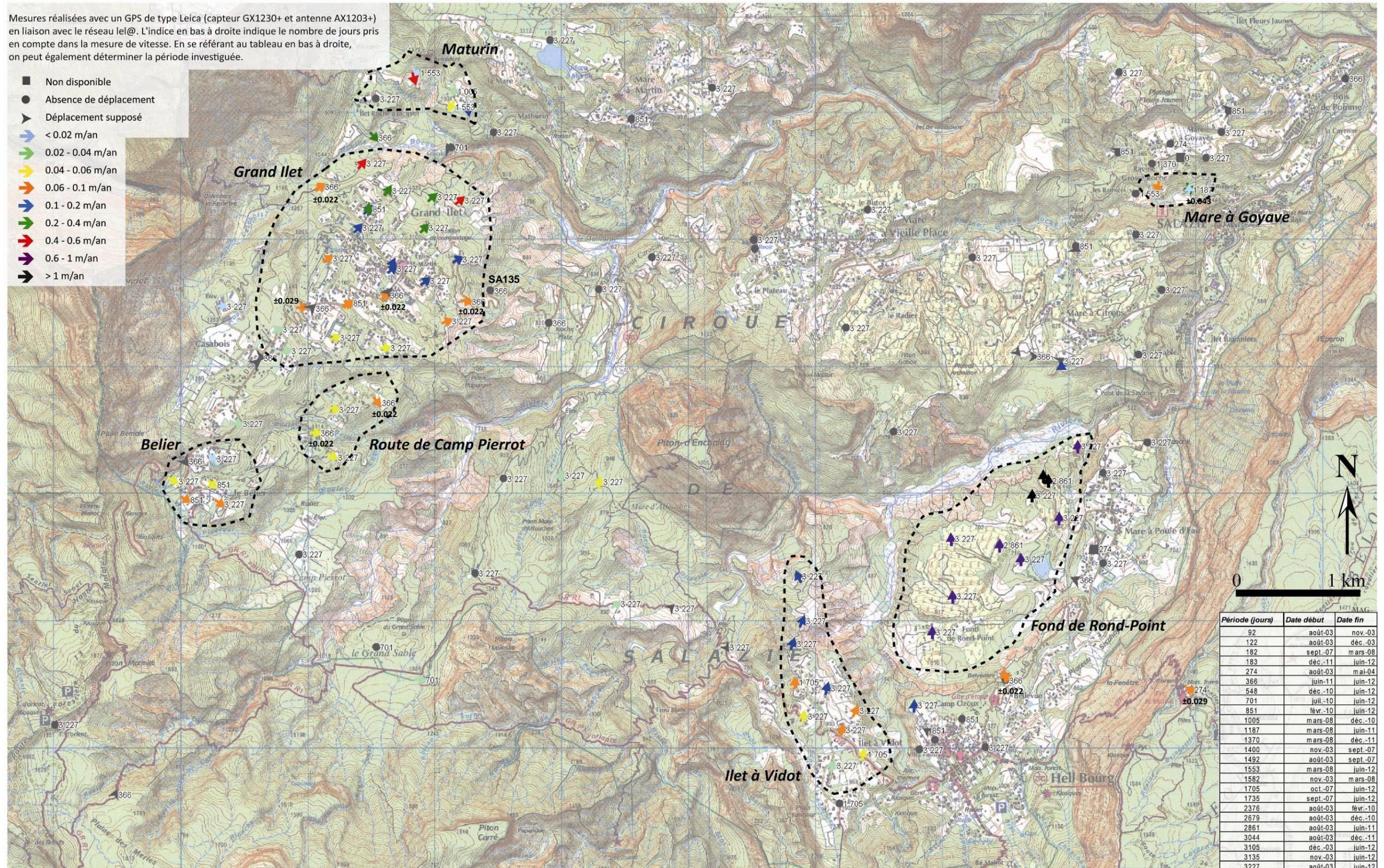


Illustration 13 : vitesses annuelles de déplacements planimétriques en m/an sur le cirque de Mafate.

Illustration 14 : vitesses annuelles de déplacements planimétriques en m/a et localisation des principaux glissements.

Mesures réalisées avec un GPS de type Leica (capteur GX1230+ et antenne AX1203+) en liaison avec le réseau Iel@. L'indice en bas à droite indique le nombre de jours pris en compte dans la mesure de vitesse. En se référant au tableau en bas à droite, on peut également déterminer la période investiguée.

- Non disponible
- Absence de déplacement
- Déplacement supposé
- < 0.02 m/an
- 0.02 - 0.04 m/an
- 0.04 - 0.06 m/an
- 0.06 - 0.1 m/an
- 0.1 - 0.2 m/an
- 0.2 - 0.4 m/an
- 0.4 - 0.6 m/an
- 0.6 - 1 m/an
- > 1 m/an



2.5.4. Tassement des glissements

Les déplacements altimétriques des bornes sont visibles essentiellement dans le cirque de Salazie.

Dans le cirque de Cilaos, deux bornes indiquent un tassement significatif de 0.08 m pour CI23 et 0.09 m pour CI08 avec des pentes de glissement de respectivement 20 et 34°. Les tassements concernent la période août 2003 – juillet 2007 (Illustration 15) à l'instar des déplacements planimétriques observés précédemment.

Dans le cirque de Mafate, une borne est marquée par un tassement distinctif. IGN0813 (Illustration 15) s'enfonce sur elle-même, aucun déplacement planimétrique n'est observé. Le tassement est de ~ 18 cm pour un déplacement planimétrique nul. Cet enfoncement est récent, il concerne la période décembre 2011 – juin 2012. Au vue de ces particularités il est certainement lié à une erreur. Des mesures complémentaires pourront le vérifier.

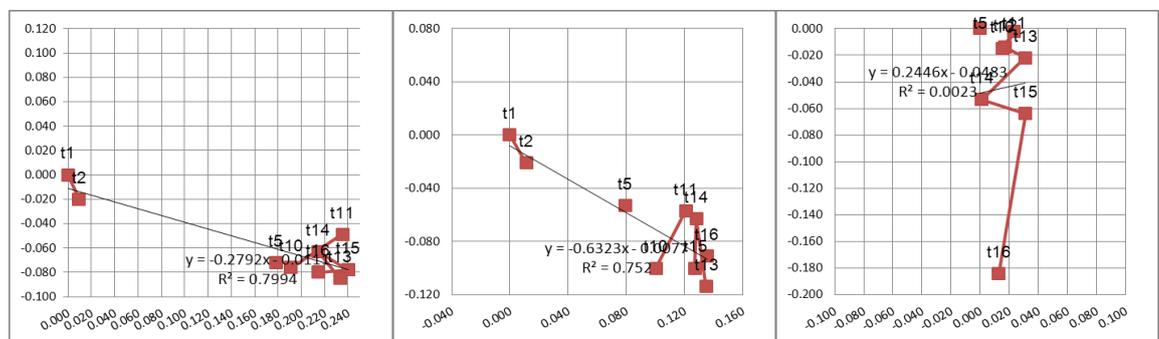


Illustration 15 : graphes orthonormés de tassement des bornes (de gauche à droite) CI23, CI08 et IGN0813. En abscisse, déplacement planimétrique cumulé en mètre ; en ordonné, tassement cumulé en mètre.

Dans le cirque de Salazie, on observe des tassements sur les glissements, déjà identifiés, de *Fond de Rond-Point*, *Grand Ilet*, *Ilet à Vidot*, *Belier*, *Mare à Goyave* et *Maturin* (Illustration 16). Ils concordent assez bien avec les vitesses de déplacements planimétriques.

Dans le détail, le tassement sur *Fond de Rond-Point* est relativement homogène. Les vitesses annuelles sont de l'ordre de 0.2 m/an exceptées pour SA04. Sa vitesse est particulièrement élevée avec 0.42 m/an.

Sur *Grand Ilet*, les vitesses de tassements sont, à l'instar des vitesses de déplacements planimétriques, croissantes vers le pied du glissement, au nord. Elles passent de 0.02 à 0.16 m/an.

Sur les glissements d'*Ilet à Vidot* et de *Maturin*, les vitesses sont très variables. Aucune organisation spatiale n'apparaît.

Enfin, sur les glissements du *Belier* et de *Mare à Goyave*, les vitesses sont lentes, inférieurs à 0.04 m/an.

2.6. PERENNISATION DU RESEAU

En l'état actuel (juin 2012), le réseau comporte 183 repères géodésiques. On en compte 40 à Cilaos, 30 à Mafate et 113 à Salazie. Il semble pertinent de prévoir le remplacement de deux d'entre eux. SA05, dans le cirque de Salazie, a été retrouvé arraché lors de la 15^{ème} tournée. Il se situait aux abords de la route menant à Fond de Rond-Point, secteur appartenant au glissement de *Fond de Rond-Point*. CI22, dans le cirque de Cilaos, a également été retrouvé arraché par des travaux de réfection de voiries. Elle bordait la route D240 au niveau de l'Ilet Le Palmiste Rouge.

Il est également nécessaire de prévoir le déplacement de SA143. Située le long du chemin descendant à la ravine Roche à Jacquot, en amont de la cascade Micheline, ce chemin sera utilisé par les engins prévus pour les travaux d'aménagement du fond de la ravine.

La pérennisation du réseau s'accompagne d'une planification des futures campagnes de mesures en fonction (i) des vitesses de déplacement observées et (ii) des évènements pluvieux potentiellement déclencheurs.

Chacun des cirques présente des caractéristiques bien différentes en termes de vitesse de déplacement. Afin d'optimiser les futures mesures de terrain, on définit le planning suivant :

- A Mafate, l'intervalle maximal de temps entre deux campagnes est fixé à 3 ans hors évènement pluvieux intense.
- A Cilaos, l'intervalle maximal de temps entre deux campagnes est fixé à 1 an hors évènement pluvieux intense.
- A Salazie, en raison des forts déplacements, deux tournées annuelles sont indispensables.

Dans le cas de fortes pluies, un retour d'expérience sur les déplacements observés comparé aux cumuls annuels des précipitations (Illustration 17) permet d'imaginer les scénarii suivants.

A Mafate, aucun déplacement significatif n'a pu être enregistré depuis 2003. Les Cyclones Diwa et Gamède des années 2006 et 2007 avec des cumuls pluviométriques mensuels de 1.77 m en mars 2006 et 2.98 m en février 2007 n'ont pas suffi à déclencher des mouvements significatifs. Ainsi, un évènement pluvieux d'intensité supérieure à ces derniers devra être suivi d'une campagne de mesure.

A Cilaos, des déplacements ont été enregistrés sur les Ilets de Bras Sec et du Palmiste Rouge. Ils sont intervenus entre les années 2003 et 2007 au sein desquelles se sont produits les cyclones Gamède et Diwa. La station météo de Cilaos a enregistré des cumuls mensuels de 1.71 m en mars 2006 et 2.87 m en février 2007. Pour des évènements d'intensité similaires, une campagne de mesure post-évènement sera indispensable.

A Salazie, deux campagnes de mesures annuelles sont programmées. Ceci est valable quel que soit le cumul des précipitations.

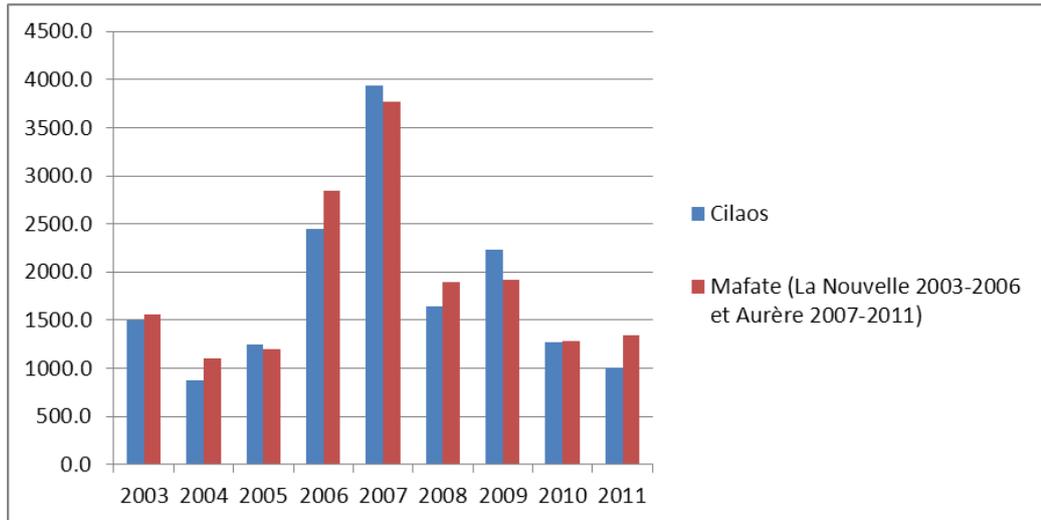


Illustration 17 : cumul annuel des pluies en mm pour les stations Météo France de Cilaos (97424410), La Nouvelle (97408580) et Aurère (97408560)..

2.7. CONCLUSION ET PERSPECTIVE

Au regard de l'analyse critique des déplacements, l'analyse qualité (CQ) présente des résultats optimistes. Elle donne une précision moyenne infracentimétrique alors que l'analyse critique des déplacements montre que les mouvements avérés les plus courts sont pluricentimétriques (4.7 cm en planimétrie et 6.5 cm en tassement). En dehors de ces valeurs, aucun mouvement n'a pu être détecté. De fait, le CQ, trop optimiste, ne peut pas être pris en compte dans l'analyse. Sur la base des éléments géodésiques immobiles le calcul des incertitudes de positionnement et de déplacement donne une estimation de la précision de la précision beaucoup plus réaliste.

Les mouvements observés concernent presque exclusivement le cirque de Salazie. Les cirques de Cilaos et Mafate ne sont pas ou très peu marqués par des déplacements. Si des mouvements les concernent, ils sont soit (i) trop lents pour être l'objet d'une mesure GPS ou (ii) ne se sont pas manifestés. Cette seconde observation est primordiale pour la poursuite des mesures. En considérant la relation pluies / déplacements et l'absence d'évènements pluvieux très intenses au cours de l'étude, la poursuite des mesures est essentielle pour détecter de futurs mouvements actifs.

Enfin, le cirque de Salazie présente des résultats fondamentaux. Plusieurs glissements sont observés. Le réseau de GPS permanents, objet du chapitre suivant, a pour but d'affiner les connaissances sur leurs vitesses de déplacements.

3. Réseau de GPS permanents

En complément du réseau de bornes géodésiques, dix GPS 'permanents' sont installés sur les glissements, déjà identifiés, du cirque de Salazie. Ils vont permettre une analyse fine des vitesses de déplacement et de leurs variations. A un pas de temps journalier, chaque antenne détermine sa position. Il en ressort une chronique de vitesse de déplacement journalière.

3.1. PRESENTATION DU DISPOSITIF ET DE SON JEU DE DONNEES

Sur les dix antennes installées dans le cirque de Salazie (Illustration 18), on compte deux générations différentes de GPS. Sept sont de type Leica 1200 avec réception GPS + GLONASS, trois sont de type Leica 500 avec réception GPS uniquement. Pour plus d'informations sur l'historique de mise en place du réseau de GPS permanents se référer au rapport d'avancement BRGM RP-59019-FR (Barbier & Aunay, 2011).

Depuis avril 2010, les trois stations Leica 500 sont programmées sur une session d'enregistrement journalière de 2 à 3 heures du matin pour minimiser l'activité ionosphérique et à un pas de temps de 1 seconde. La mesure obtenue est une moyenne sur 1 heure. Les sept stations leica 1200 enregistrent en continu toute les 30 secondes. La mesure obtenue est une moyenne sur 24 heures.

Le post-traitement s'opère différemment pour chaque génération de GPS. Pour les 3 GPS Leica 500, après avoir récupéré les données brutes sur le terrain, les données sont post-traitées avec les données du réseau Lel@. Pour les 7 GPS Leica 1200, les données sont télétransmises et le post-traitement est réalisé avec le logiciel *Spider* qui est géré par *Précision Topo*. Pour plus de détails sur la méthodologie du suivi ainsi que sur le traitement des données se référer au précédent rapport BRGM/RP-59019-FR (Barbier & Aunay, 2011).

Depuis 2004, début de l'installation des GPS permanents avec deux antennes, jusqu'à aujourd'hui ou l'on en compte 10, plusieurs méthodes de post-traitement ont été réalisées. A ce jour, la méthode la plus précise est celle se référant à la station du réseau Lel@ (MAVP) qui a été installée, dans cet objectif d'amélioration de la précision, en août 2010. Pour cela, le début de l'analyse des chroniques de déplacement du présent rapport est fixé à la date du 10 août 2010.

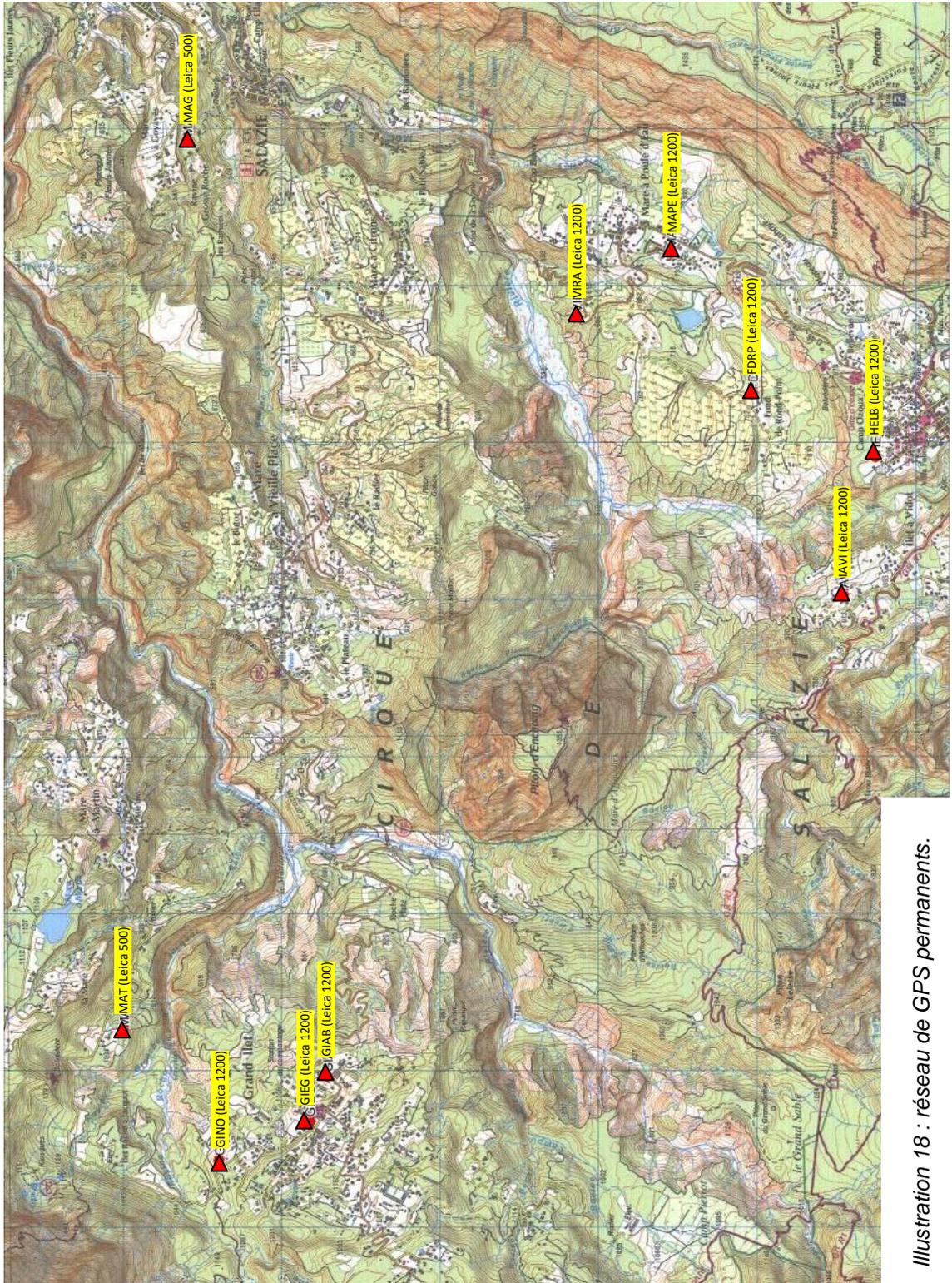


Illustration 18 : réseau de GPS permanents.

3.2. ANALYSE DES PERTES DE DONNEES

L'enregistrement quotidien des mesures montre certaines faiblesses, les stations GPS ont un pourcentage de pertes qu'il convient d'analyser.

Pour les trois stations Leica 500, on note un pourcentage de valeurs manquantes (Tableau 5) de respectivement 7.1%, 25.1% et 8.4% pour les stations FDRP, MAT et MAG. Deux origines sont possibles : *fichier RINEX* (issu du réseau lel@) incomplet ne permettant pas le calcul. Ce problème relève du réseau Lel@ - *fichier GEODB* issu des récepteurs Leica 500 incomplet ou manquant ne permettant également pas le calcul. Ce dernier s'est accéléré depuis octobre 2011 sur la station MAT (Illustration 19). Il semble qu'il soit lié au formatage de la carte mémoire lors de la récupération des données sur le terrain. Les fonctions du GPS permettent deux types de formatage, un 'rapide' et un 'complet'. Jusqu'à présent on procédait à un formatage 'rapide'. Cependant, après une certaine succession d'accumulation de données sur la carte, il ne permet pas un 'nettoyage' suffisant et engendre une perte de données (pour une utilisation quotidienne, Leica préconise un formatage 'complet' tous les mois). Dorénavant, après chaque campagne de récupération de données, on procédera à un formatage 'complet' pour éviter toute perte.

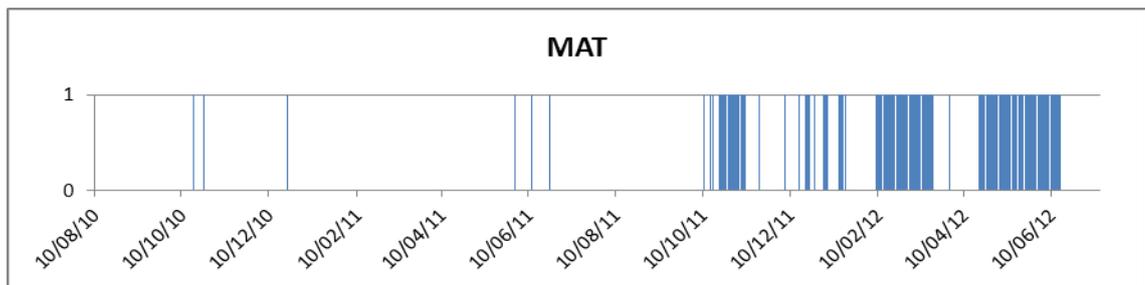


Illustration 19 : perte de données en bleu pour la stations MAT.

Pour les sept stations Leica 1200, les manques n'excèdent pas 5% (Tableau 5). On note une moyenne à 3.8%. Ils sont principalement causés par des coupures de courant et/ou des problèmes de télétransmission, notamment pour VIRI. Cette dernière est équipée d'un système de communication GSM moins performant que le système via internet qui équipe les autres stations.

Au regard de la différence entre les systèmes Leica 1200 et Leica 500, on peut dire que la technologie utilisée par les systèmes Leica 1200 est plus efficace. Cette différence est due au temps de réactivité lorsqu'un défaut intervient. Pour les stations Leica 1200, la télétransmission permet une visibilité quotidienne des données. La réactivité en cas de problème est donc quasi-immédiate ce qui n'est pas le cas pour les Stations Leica 500. En effet, pour ces dernières, les données sont récupérées mensuellement sur site. En cas de problème, la perte de données ne sera visible qu'après une visite mensuelle.

Station GPS	% de manque	Seuil de tolérance à j-1	% aberration X	% aberration Y	% aberration Z
VIRA	4.3	1 cm plani - 3 cm alti	5.6	5.5	8.1
MAPE	4.1	1 cm plani - 3 cm alti	6.7	6.6	8.2
HELB	3.4	1 cm plani - 3 cm alti	6.1	6.2	6.9
GINO	2.5	1 cm plani - 3 cm alti	4.6	3.8	4.9
GIEG	4.6	1 cm plani - 3 cm alti	3.8	3.6	5.0
GIAB	3.4	1 cm plani - 3 cm alti	3.9	3.6	5.2
IAMI	4.3	1 cm plani - 3 cm alti	3.3	3.2	4.0
FDRP	7.1	2 cm plani - 5 cm alti	4.0	4.3	11.3
MAT	25.1	2 cm plani - 5 cm alti	4.0	4.2	9.5
MAG	8.4	2 cm plani - 5 cm alti	4.2	4.2	13.8

Tableau 5 : bilan du % de valeurs manquantes et aberrantes.

En trame de fond bleu, les 7 stations Leica 1200 ; en vert les 3 stations Leica 500.

Pour les 7 stations Leica 1200, le % de valeurs manquantes est calculé sur la période 10/08/2010 – 9/12/2012. Pour les 3 stations Leica 500 sur la période 10/08/2012 – 16/11/2012.

Les valeurs aberrantes sont calculées sur deux seuils de tolérance à j-1 (différence entre une valeur et sa précédente). Pour les stations Leica 500 : seuil **A** (2 cm en planimétrie et 5 cm en altimétrie) qui correspond à la précision annoncé par le réseau LeI@. Pour les stations Leica 1200 : seuil **B** plus fin (1 cm en planimétrie et 3 cm en altimétrie).

3.3. ANALYSE DE LA PRECISION

La précision du positionnement GPS / GNSS n'est pas une grandeur constante dans le temps et l'espace. Il apparait donc essentiel d'analyser la qualité de la précision de nos mesures.

Au-delà d'un certain écart entre 2 coordonnées consécutives (X, Y ou Z) sur les chroniques, la mesure est considérée comme aberrante et est écartée du jeu de donnée. Par souci de détail, on retient deux valeurs seuil au-delà desquelles les données sont aberrantes et soustraites des chroniques (Tableau 5). Un premier seuil **A** (2 cm en planimétrie et 5 cm en altimétrie) qui correspond à la précision annoncé par le réseau LeI@ et un second seuil **B** plus fin (1 cm en planimétrie et 3 cm en altimétrie). Ce second seuil permet d'affiner les mesures de déplacements pour les stations Leica 1200 qui montrent une précision supérieure à celle annoncée par le réseau LeI@.

Dans le détail, on est en mesure d'apprécier la qualité des données relatives à chaque antenne (Tableau 5) :

- L'antenne IAMI offre les résultats les plus précis. La précision planimétrique est infracentimétrique pour presque 97 % des mesures. En altimétrie, elle est inférieure à 3 cm pour 96% des mesures.
- Les GPS de Grand Ilet (GINO, GIAB et GIEG) offrent également une bonne précision. En planimétrie, elle est infracentimétrique pour ~ 96% des mesures. En altimétrie, elle est inférieure à 3 cm pour ~ 95% des mesures.
- Les antennes VIRA, MAPE et HELB sont de précision quasi-équivalente. On relève une très légère baisse. En planimétrie, la précision est infracentimétrique pour ~ 94% des mesures. En altimétrie, elle est supérieure à 3 cm pour ~ 92 - 93% des mesures.

- Les antennes des GPS Leica 500 (FDRP, MAT et MAG) ont une précision inférieure. En planimétrie, la précision à 2 cm vaut pour ~ 96% des mesures. En altimétrie, la précision varie en fonction de chaque antenne. Elle est inférieure à 5 cm pour ~ 90.5% des mesures de MAT, ~ 89% des mesures de FDRP et ~ 86% des mesures de MAG.

3.4. LISSAGE DES COURBES DE VITESSE DE DEPLACEMENT

Les vitesses de déplacement journalière sont inférieures à la précision (infra)centimétrique des systèmes GPS / GNSS. Cela produit du bruit sur les chroniques (Illustration 20) qui oblige à lisser les courbes de vitesses de déplacements planimétriques.

3.4.1. Méthode des moyennes mobiles

Avant le calcul des vitesses, les moyennes mobiles centrées sont calculées sur les coordonnées X et Y des stations GPS.

Le point négatif de cette méthode est que les valeurs de vitesses lissées sont moyennées sur un nombre élevé de données journalières. Cela produit un décalage dans le temps du début des phases d'accélération (Illustration 20). Ce décalage sera proportionnel à la période prise en compte pour le calcul des moyennes mobiles.

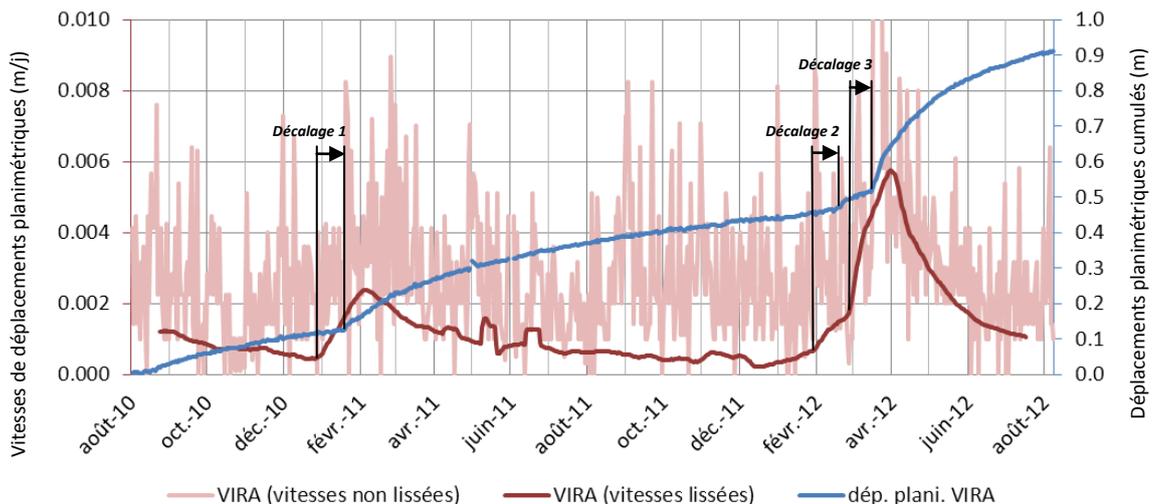


Illustration 20 : représentation du bruit des données de vitesses non lissées et mesure du décalage du début des phases d'accélération produit par la méthode de lissage par moyenne mobile sur la station VIRa.

L'accélération de la courbe de vitesses lissées démarre ~ 10 jours avant l'accélération réelle visible sur la courbe de déplacement planimétrique.

3.4.2. Détermination de la période

Le nombre de mesures à intégrer aux moyennes mobiles peut être estimé à l'aide du périodogramme ou Densité Spectrale de Puissance (DSP) (Pinault, 2007 - BRGM/RP-55313-FR). La fréquence de coupure f_c est, sur le spectre du périodogramme, la fréquence à partir de laquelle l'information peut être considérée comme négligeable. De fait, elle peut servir de filtre pour éliminer le bruit. Pour une f_c de période 15 jours,

on a une moyenne mobile à $2 \times 15 = 30$ jours. Dans le détail, les f_c sont calculées sur les coordonnées X et Y de chaque station dont on retient la plus forte valeur (Illustration 21). Les périodes recommandées pour le calcul des moyennes mobiles



Illustration 21 :
détermination des f_c sur les périodogrammes de VIRA X et VIRA Y. L'axe des abscisses correspond à l'indice de corrélation ; l'axe des ordonnées à la période en h^{-1} .

f_c VIRA X = 402.8852 heures soit ~ 17 jours

f_c VIRA Y = 361.4118 heures soit ~ 15 jours



f_c VIRA = 17 jours

sont :

VIRA : $17 \times 2 = 34$; MAPE : $19 \times 2 = 38$; HELB : $20 \times 2 = 40$; GINO : $15 \times 2 = 30$; GIEG : $15 \times 2 = 30$; GIAB : $15 \times 2 = 30$; IAVI : $17 \times 2 = 34$; FDRP : $14 \times 2 = 28$; MAG : $14 \times 2 = 28$; MAT : $10 \times 2 = 20$.

3.4.3. Evaluation de la méthode

Pour chaque coordonnées X et Y, les périodogrammes sont construits avec des segments de 32 jours. La coordonnée Z est trop bruitée par l'imprécision, des courbes de vitesses ne peuvent pas être obtenues. Ainsi, la valeur des f_c détermine les moyennes mobiles à appliquer aux coordonnées X et Y qui sont ensuite utilisées pour le calcul des vitesses de déplacements planimétriques. Pour une optimisation des courbes, on procède à un second lissage également par la méthode des moyennes mobiles. Ce second calcul sur les vitesses des déplacements planimétriques obtenues précédemment intègre 11 valeurs pour chaque station GPS (annexe 6). Dans le détail, le lissage des courbes de vitesses intègre 31 mesures journalières pour MAT, 39 pour MAG et FDRP, 41 pour GIEG GIAB ET GINO, 45 pour VIRA et IAVI, 49 pour MAPE et 53 pour HELB.

A ce stade de l'étude, la méthode proposée présente plusieurs artefacts. Le lissage des courbes de vitesses produit un décalage du début de l'accélération mais pas seulement. Les phases de croissance et décroissance de vitesses sont transformées. Leurs progressions sont atténuées par les moyennes mobiles. Par conséquent, seules les valeurs de vitesses, et non leur variation, peuvent être interprétées quantitativement.

3.5. RESULTATS

3.5.1. Déplacements planimétriques

En planimétrie (Illustration 22), les GPS du glissement de *Fond de Rond-Point* (VIRA et FDRP) montrent des déplacements cumulés de 0.9 et 0.7 m entre août 2010 et 2012 avec des accélérations en saison des pluies. Ce phénomène est également visible pour les GPS du glissement de *Grand Ilet* (GINO, GIAB et GIEG) mais beaucoup moins marqué. Les antennes IAVI, MAT, HELB, MAG et MAPE ont des déplacements cumulés peu importants sur les deux années d'études. Cependant, on note pour IAVI, MAT et plus particulièrement MAG, un déplacement 'soudain' mi-mars 2012. Il est synchrone aux accélérations observées sur les autres antennes et intervient après l'épisode pluvieux le plus franc de la période étudiée.

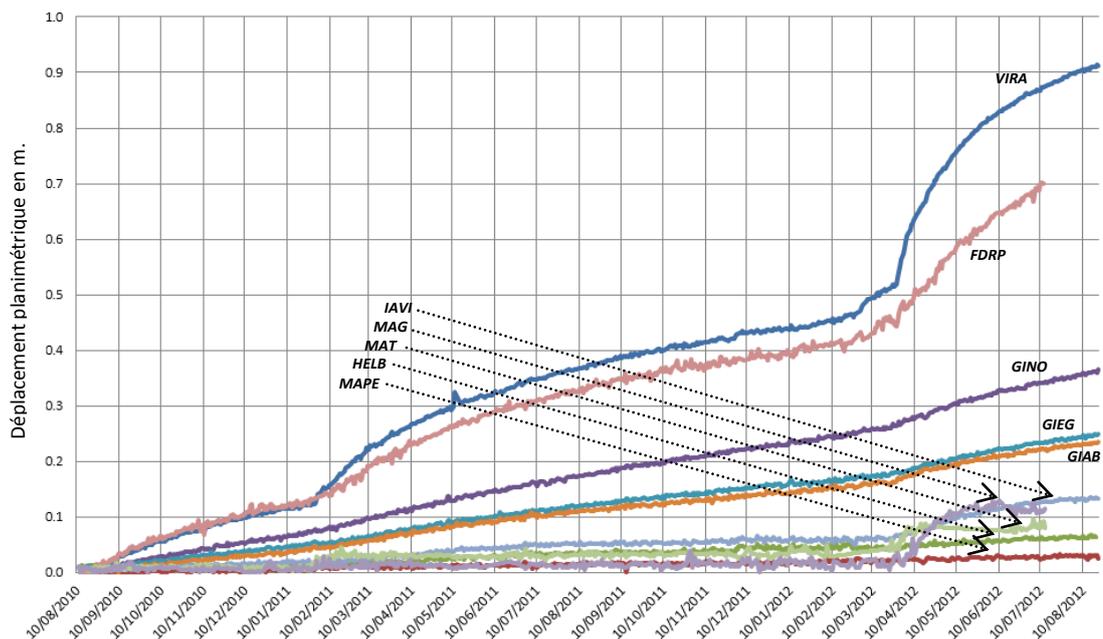


Illustration 22 : déplacement planimétrique des GPS permanents en m.

3.5.2. Tassements

En tassement (Illustration 23), l'imprécision GPS ainsi que les faibles valeurs rendent l'analyse délicate. On observe seulement que les tassements cumulés sur les deux années sont de ~ 0.15 m pour VIRA ; 0.06 m pour MAPE ; 0.1 m pour HELB, GINO et GIEG ; 0.05 m pour GIAB et MAT ; 0.13 m pour IAVI ; 0.2 m pour FDRP et MAG.

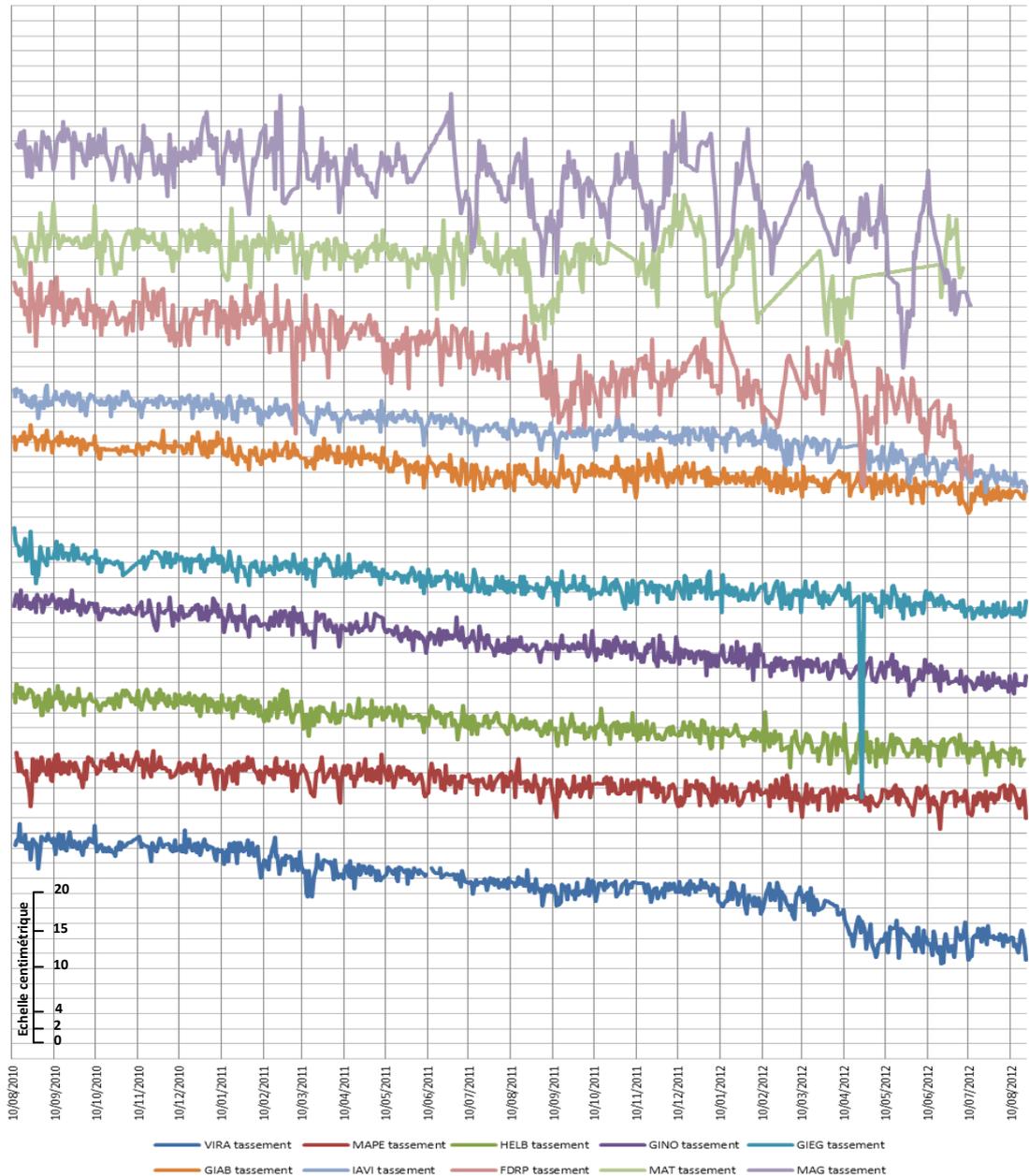


Illustration 23 : tassement des GPS permanent. Pour une meilleure visualisation, les tassements sont représentés sur une échelle relative d'unité 2 cm.

3.5.3. Vitesses de déplacement planimétriques

En gardant à l'esprit les artefacts présent dans la méthode de lissage des courbes de vitesses par moyennes mobiles, l'analyse des variations de vitesses sera uniquement qualitative.

Chaque glissement présente des caractéristiques différentes :

- **Fond de Rond-Point** (Illustration 24) : les GPS VIRA et FDRP montrent des profils de vitesse semblables sur les deux années d'études. La vitesse minimale, hors saison des pluies est de ~ 0.5 mm/jour soit un peu moins de 20 cm/an. Les deux courbes présentent deux phases d'accélération synchrones. En 2011 VIRA passe de 0.5 mm/jour à presque 2.4 mm/jour ; FDRP passe de 0.5 à 1.7 mm/jour. En 2012, les accélérations sont encore plus marquées. VIRA et FDRP passent de 0.5 à 5.7 et 0.5 à 3 mm/jour. A l'inverse, la décélération jusqu'à la vitesse minimale est beaucoup moins franche.
- **Grand Ilet** (Illustration 25) : les courbes des trois antennes restent assez bruitées. Cependant, les profils de vitesse de chaque GPS sont semblables et les tendances à l'accélération et la décélération sont mise en évidence. Sur les antennes GIEG et GIAB, la vitesse minimale des glissements est de l'ordre de 0.2 à 0.3 mm/jour soit un peu moins de 10 cm/an. Sur GINO, la vitesse minimale est supérieure, de l'ordre de 0.3 à 0.4 mm/jour soit un moins de 13 cm/an. On note, comme sur le glissement de Fond de Rond-Point, deux phases d'accélération rapides suivies par une décélération progressive. On note également que l'accélération de 2012 est plus importante qu'en 2011. En 2011, l'augmentation de vitesse est de l'ordre de 2.5 mm/jour alors qu'elle est de l'ordre de 5 mm/jour en 2012, soit deux fois supérieure.
- **Maturin et Mare à Goyave** (Illustration 26) : sur ces glissement, les vitesses minimale sont de l'ordre 0.2 mm/jour soit ~ 7 cm/an. En 2011, MAG n'accélère pas alors que MAT passe de 0.2 à 1.1 mm/jour très rapidement. En 2012, chaque antenne accélère fort et vite. On passe de 0.2 à 1.7 mm/jour pour MAT et de 0.2 à 2.6 mm/jour pour MAG. Là aussi les décélération sont très brèves.
- **Antennes IAVI, MAPE et HELB** (Illustration 27) : elles enregistrent des déplacements très lents. Le bruit relatif à la précision est donc plus marqué. Pour chaque antenne, la vitesse minimale approche 1 mm/jour soit un peu moins de 4 cm/an. Pour MAPE et HELB aucune accélération n'apparaît clairement. Seul IAVI montre une accélération très nette en 2012 jusqu'à 0.8 mm/jour avec une décélération qui semble plus progressive mais les données manquent pour apprécier le phénomène.

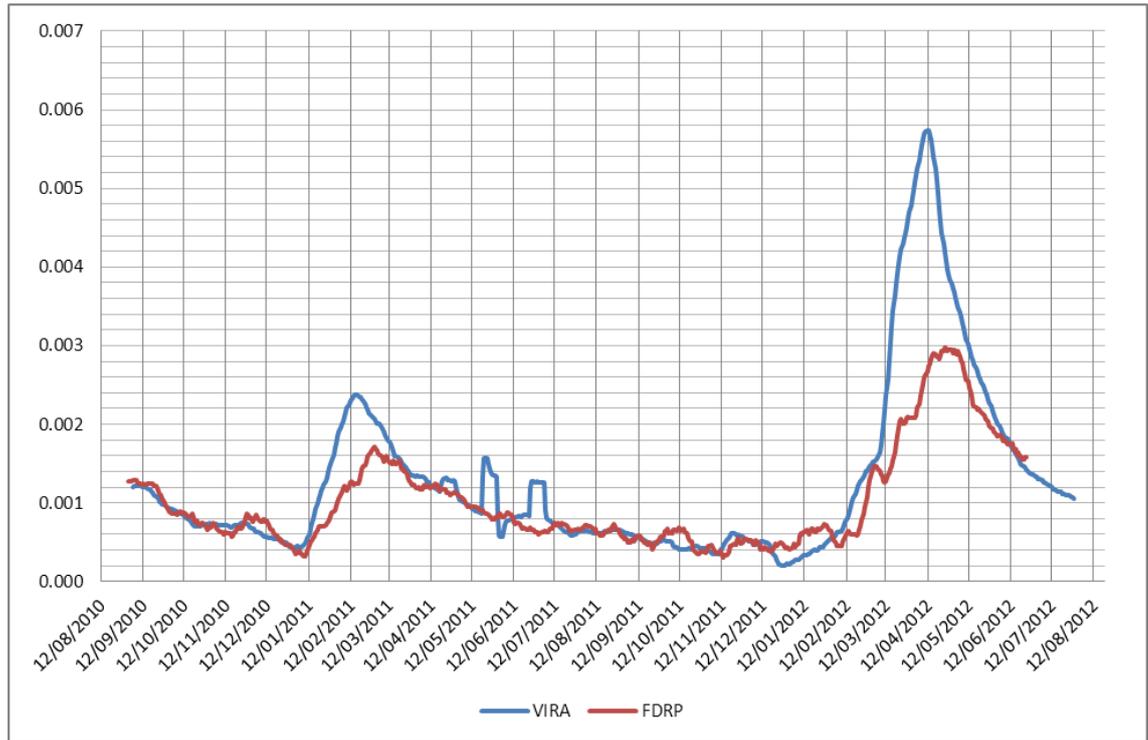


Illustration 24 : courbe de vitesse en m/jour des GPS sur le glissement de Fond de Rond-Point.

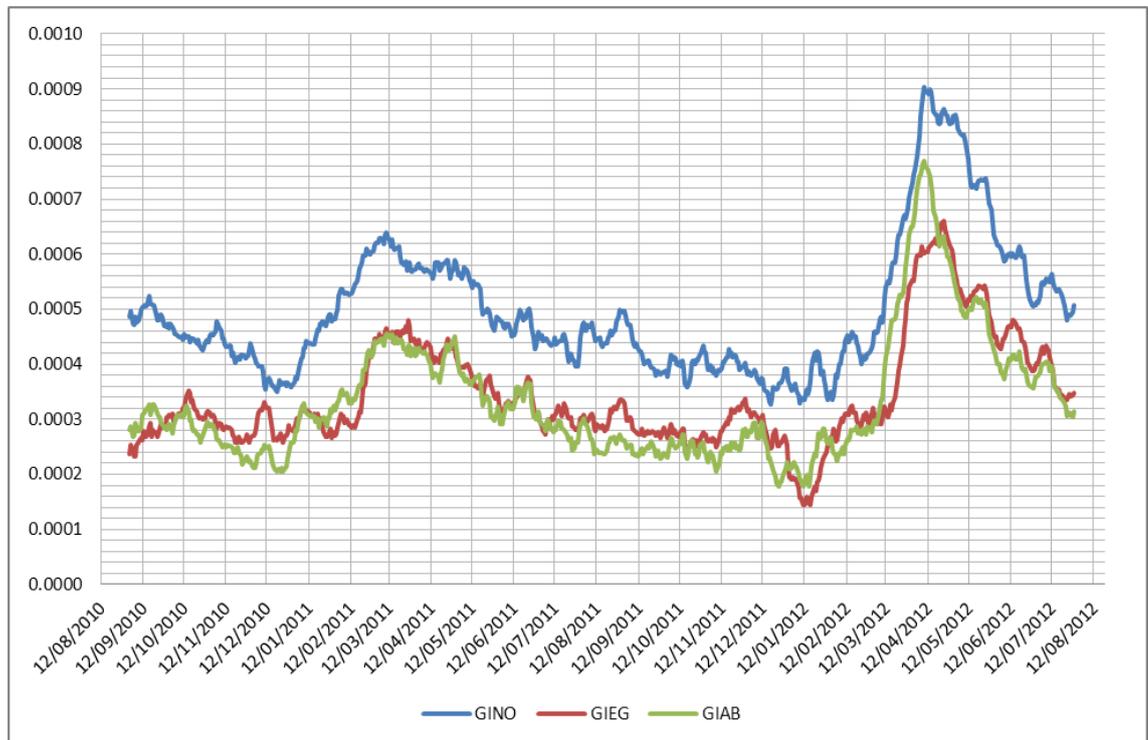


Illustration 25 : courbe de vitesse en m/jour des GPS sur le glissement de Grang Ilet.

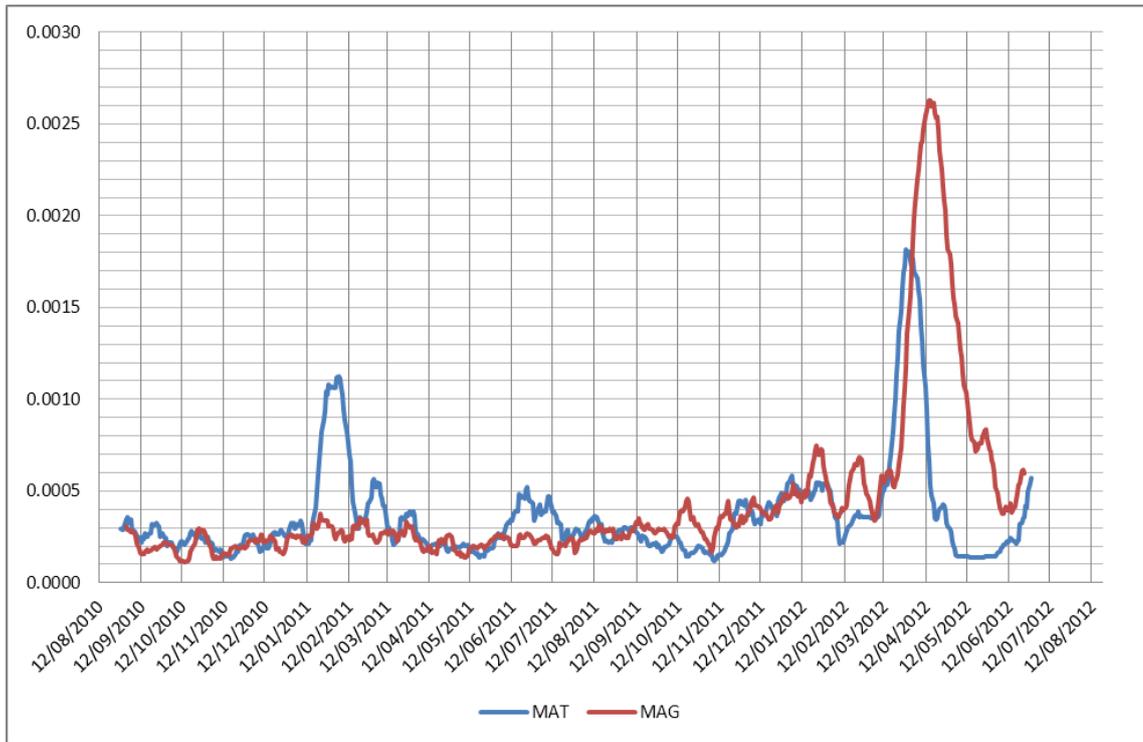


Illustration 26 : courbe de vitesse en m/jour des GPS sur les glissements de Maturin et Mare à Goyave.

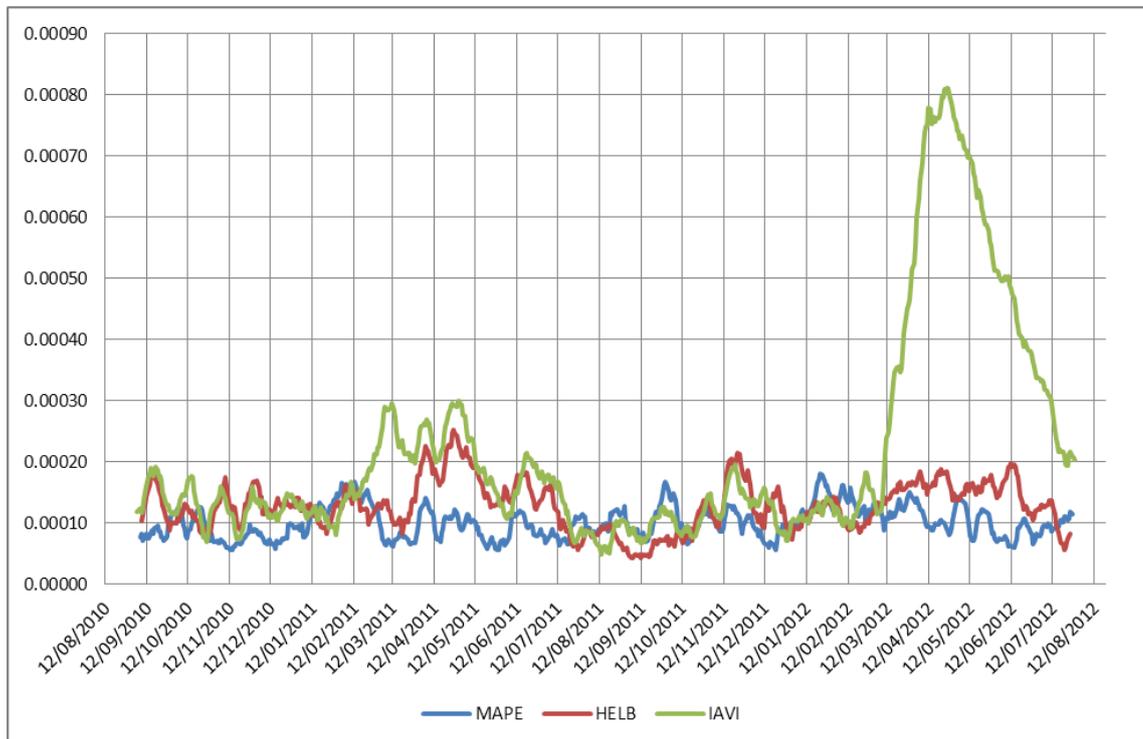


Illustration 27 : courbe de vitesse en m/jour des antennes MAPE, HELB et IAVI.

3.6. CONCLUSION ET PERSPECTIVE

La précision est, à l'instar des mesures effectuées au précédent chapitre sur les bornes géodésiques, une grandeur difficilement quantifiable. Elle est d'ordre centimétrique pour les antennes des stations Leica 500 et infracentimétrique pour les antennes des stations Leica 1200. Aussi, on note des différences de rendement entre les deux systèmes. Les systèmes Leica 1200, plus récents, présentent des chroniques plus complètes.

L'obtention des courbes de vitesses est un exercice délicat. Les déplacements journaliers sont inférieurs à la précision et génèrent du bruit. Sa réduction, par la méthode des moyennes mobiles, est soumise à des artefacts qui, dans l'état actuel de l'étude, n'ont pas pu être éliminés. Ainsi, les valeurs de vitesses sont une donnée fiable mais pas leurs variations. Le lissage des courbes de vitesses modifie les phases d'accélération et de décélération des glissements, un décalage doit donc être pris en compte lors de l'interprétation.

A l'avenir, il semble essentiel d'envisager l'utilisation du logiciel de post-traitement GAMIT/GLOBK qui se compose d'une suite de programmes scientifiques pour le traitement des données GPS dans le cadre d'étude de mouvements crustaux (de l'ordre de quelque centimètre par an).

4. Exploitation des résultats issus des réseaux géodésiques

Préalablement à l'analyse des données visant à amener des éléments de compréhension des mouvements de terrains de grande ampleur à la Réunion, on réalise un comparatif des résultats obtenus sur les différents réseaux. Il a pour objectif d'assurer leurs cohérences.

Ensuite, plusieurs points sont abordés. Le réseau de bornes géodésiques vise à spatialiser les glissements et appréhender leur géométrie. Le réseau de GPS permanents vise à quantifier les vitesses et les accélérations des glissements, notamment en fonction des saisons et de la pluviométrie.

4.1. COMPARAISON DES DEPLACEMENTS ISSUS DES BORNES GEODESIQUES ET DES GPS PERMANENTS

Pour vérifier la cohérence entre les données issues de chacun des réseaux et assurer leurs résultats, les déplacements des GPS permanents sont comparés à ceux des bornes géodésiques voisines.

Les GPS permanents ont des déplacements cohérents avec les bornes qu'ils côtoient (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**). Seul HELB et MAG n'ont pas de bonne similitude vis-à-vis des bornes voisines. Cependant, aucune borne ne leurs sont réellement proches.

De la même manière, lorsque les déplacements sont suffisamment importants pour être significatifs (GPS et bornes des glissements de Grand Ilet et Fond de Rond-Point), les orientations des déplacements des GPS concordent avec celles des bornes. Cela témoigne de la crédibilité des résultats issus de chacun des réseaux.

GPS / Bornes	Déplacement planimétrique (m)	Orientation du déplacement (°)	Ecart mesuré par rapport aux GPS (m)
FDRP	0.676	92	/
SA06	0.637	92	0.039
SA08	0.614	96	0.062
VIRA	0.863	92	/
SA04	0.895	91	0.033
GINO	0.335	45	/
SA52	0.452	55	0.117
SA128	0.283	40	0.052
GIEG	0.222	40	/
SA56	0.207	42	0.015
GIAB	0.219	33	/
SA57	0.222	40	0.003
IAMI	0.124	75	/
IGN2107	0.154	83	0.030
HELB	0.069	111	/
SA17	0.227	89	0.158
MAPE	0.026	187	/
SA12	0.011	124	0.015
MAG	0.110	292	/
SA33	0.183	261	0.073
MAT	0.073	271	/
SA70	0.079	280	0.007

Tableau 6 - Tableau 6 : comparaison des déplacements entre les GPS permanents et les bornes géodésiques voisines.

4.2. DELIMITATION DES GLISSEMENTS DE FOND DE ROND-POINT ET GRAND ILET

Le réseau, malgré sa forte densité dans le cirque de Salazie, ne permet pas de délimiter finement les grands glissements. Cependant, en couplant les informations avec la topographie et les connaissances du terrain, on peut approximer les limites des glissements de *Grand Ilet* et *Fond de Rond-Point* (Illustration 28). Chacun d'entre eux ont des superficies d'environ 2 km².

Une étude à venir, basée sur les techniques de télédétection satellitaire, aura pour objet de préciser les limites des glissements.

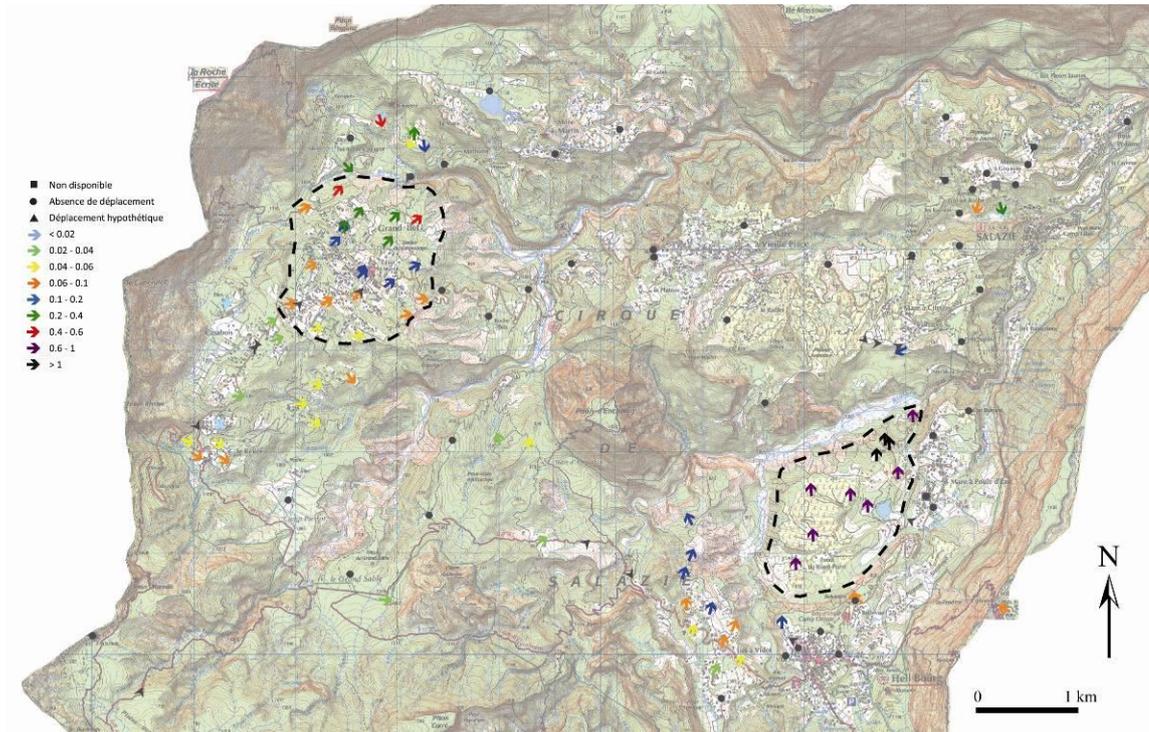


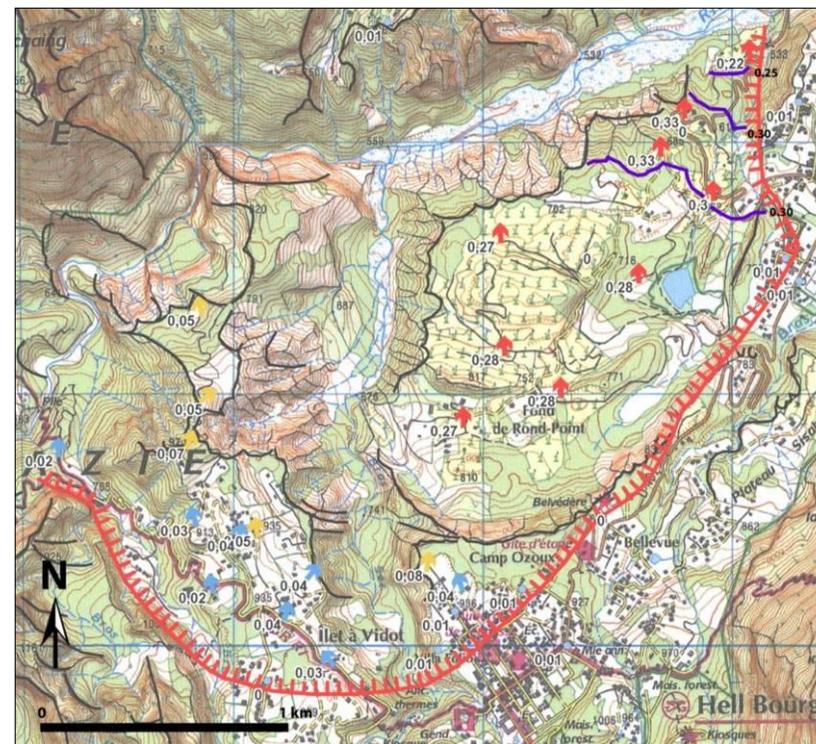
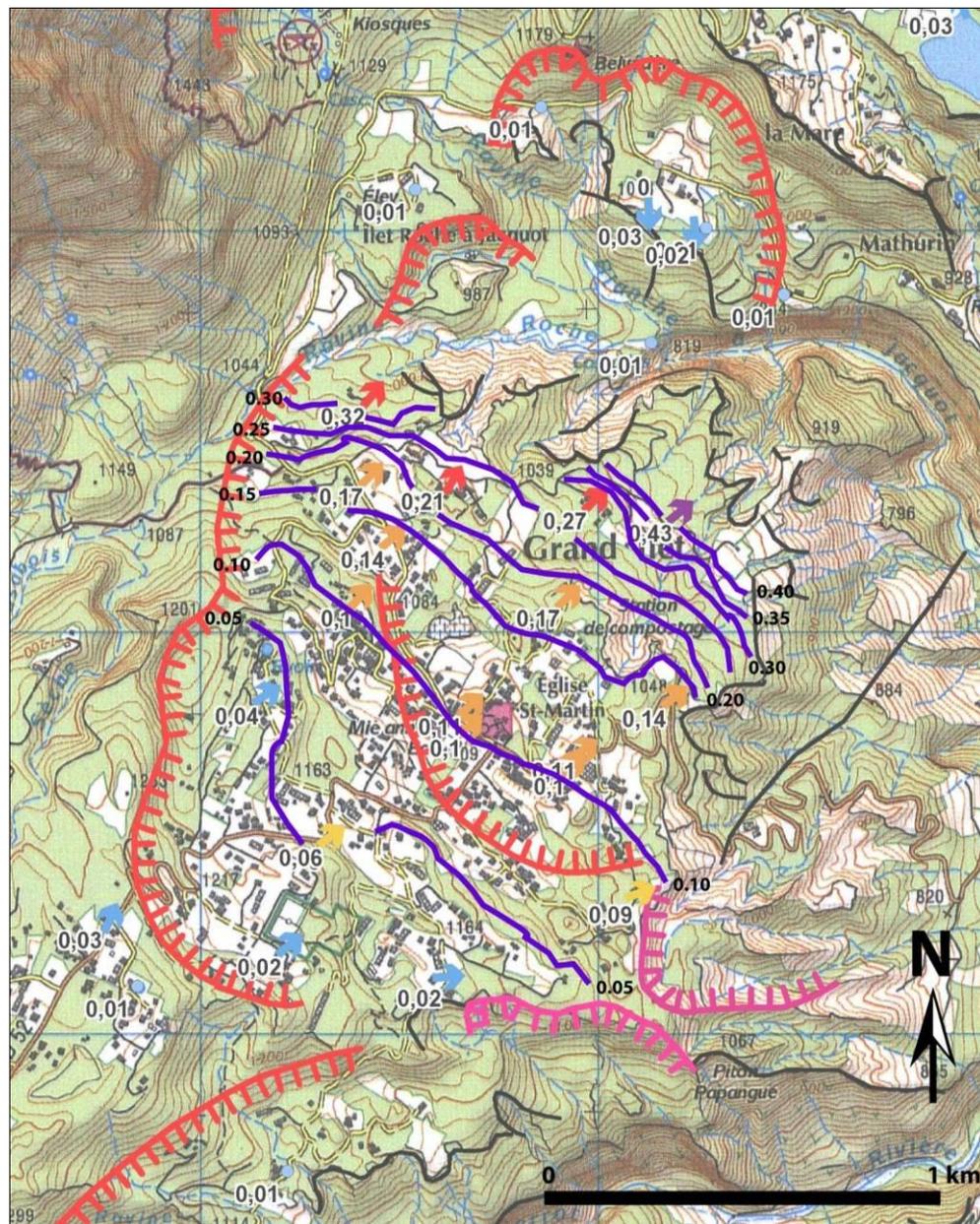
Illustration 28 : délimitation approximative des glissements de Grand Ilet et Fond de Rond-Point.

4.3. ORGANISATION SPATIALE DES VITESSES SUR LES GLISSEMENTS DE FOND DE ROND-POINT ET GRAND ILET

En raison de l'étendue des glissements de *Grand Ilet* et *Fond de Rond-Point* et la densité du réseau de bornes y figurant, des cartes d'iso-déplacements peuvent être élaborées (Illustration 29).

D'une part, la géomorphologie (tête de glissement et instabilité) couplée à la présence de dégradations dans les infrastructures va servir de limite aux isolignes. D'autre part, la topographie va servir de guide à leur tracé.

Grand Ilet : accélération progressive tête/pied de glissement (Illustration 30). On passe de vitesses proche de zéro en tête à des vitesses $>$ à 0.30 m/an en pied de glissement. On mesure même 0.43 m/an sur SA54 (bordure Nord-Est).



Déplacements planimétriques sur la période 12/2010 à 12/2011 (mesure GPS sur bornes géodésiques). L'indice figurant en bas à droite de chaque figuré indique la valeur de déplacement en mètre.

- Non disponible
- < à 2 cm
- 2 à 5 cm
- 5 à 10 cm
- 10 à 20 cm
- 20 à 40 cm
- > à 40 cm

Eléments géomorphologiques

- Tête de glissement (Mvt grande ampleur_Mvterre 2_2011_V0.TAB)
- Instabilité (Carte instabilité Mvterre 2_2011_V0.TAB)

Proposition d'une cartographie des vitesses de déplacement superficielles des glissements de Grand Ilet et Hell Bourg

- Isoligne supposée des vitesses superficielles de déplacement (équidistance : 0.05cm/an).

Illustration 29 : organisation spatiale des vitesses sur les glissements de Grand Ilet et de Fond de Rond-Point.

Fond de Rond-Point : la majorité du glissement enregistre des valeurs de l'ordre de 0.25 à 0.30 m/an. Quelques valeurs dépassent 0.30 m/an dans le secteur Nord-Est et montre une légère accélération.

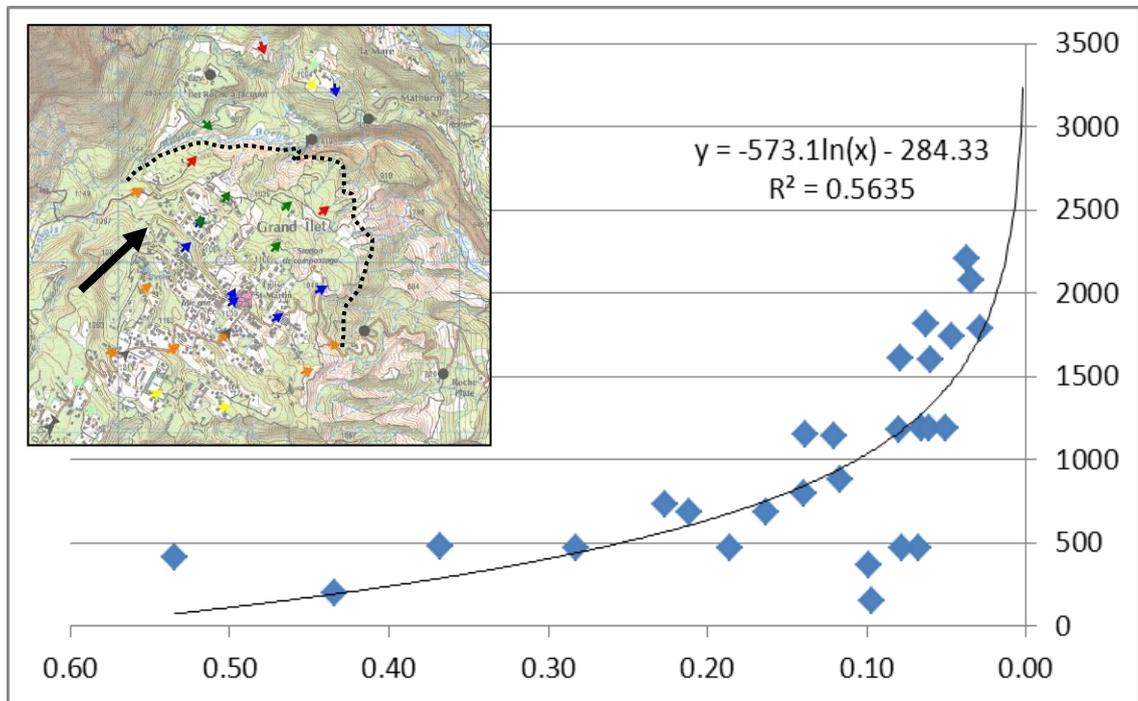


Illustration 30 : rapport entre la distance des bornes par rapport au pied du glissement et les vitesses de déplacement sur Grand Ile.

La distance borne / pied de glissement (tireté noir sur l'extrait de carte IGN) et mesurée parallèlement à la direction du glissement (flèche noir sur l'extrait de carte IGN).

La répartition des vitesses superficielles montre que les deux glissements ont des comportements bien différents. L'accélération progressive tête/pied de *Grand Ile* ne se retrouve pas sur *Fond de Rond-Point*. Son comportement apparaît beaucoup plus homogène. L'ensemble du glissement se déplace à des vitesses proches de 0.3 m/an.

4.4. INCLINAISON DU DEPLACEMENT DES PRINCIPAUX GLISSEMENTS

En ce qui concerne l'inclinaison de la surface morphologique du glissement (Illustration 31 et Illustration 32), *Fond de Rond-Point* et *Grand Ile* montrent des valeurs relativement constantes et peu élevées. Pour *Fond de Rond-Point*, la pente moyenne est de ~ 13°. Les valeurs sont comprises entre 10 et 13° avec une valeur à 18° pour SA04. Pour *Grand Ile*, la pente moyenne est de ~ 15°.

Les glissements *d'Ilet à Vidot* et *Maturin* sont marqués par de très fortes variations de 16 à 66°, sans réelle organisation spatiale. Les valeurs de pente moyenne sont de

respectivement 45 et 28°. Cependant elles sont sans grand intérêt du fait des fortes variations.

Les glissements du *Belier* et de *Mare à Goyave* manquent de mesures pour être représentatifs. L'inclinaison de la surface morphologique du glissement varie de 21 à 42° pour le premier et 23 à 56° pour le second.

On observe également plusieurs tassements isolés avec des pentes élevées tel que celui de SA40 qui borde le haut du rempart dominant la rivière du Mât au sud de Mare à Citrons. Son déplacement semble être produit par sa position. En effet, SA39, à quelques mètres de SA40 mais en retrait par rapport à la tête du rempart, a un déplacement quasi-nul. De fait, son déplacement semble être un phénomène de glissement localisé sur la bordure du rempart.

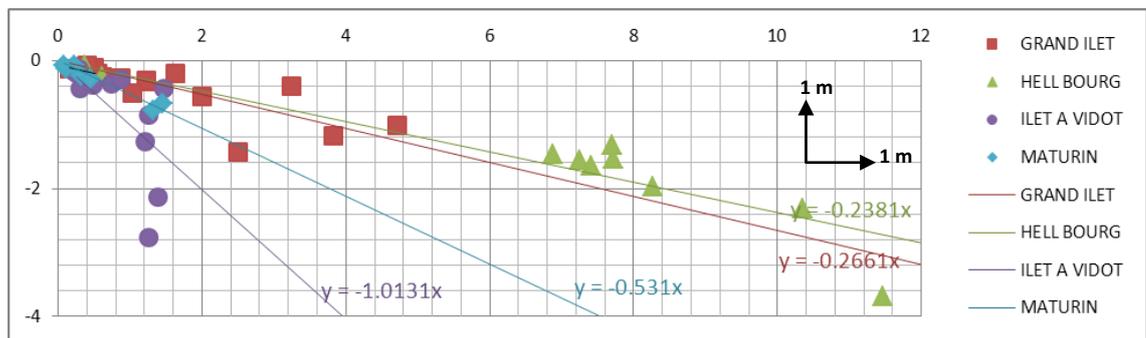


Illustration 31 : graphe orthonormé métrique présentant, pour chaque grand glissement, en abscisse le déplacement planimétrique et en ordonnée le tassement des bornes. Quatre droites de régression caractérisent la pente moyenne des glissements.

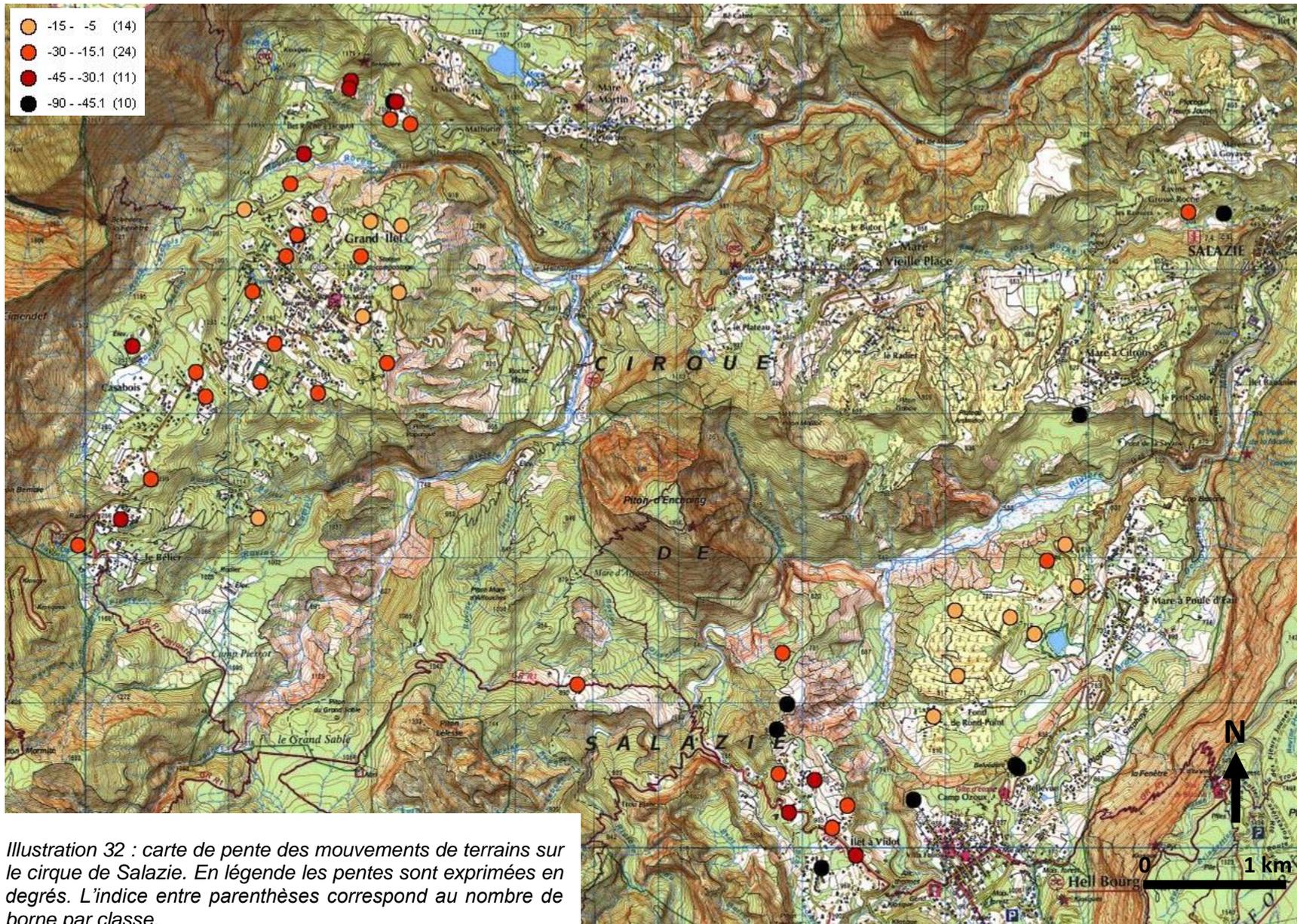


Illustration 32 : carte de pente des mouvements de terrains sur le cirque de Salazie. En légende les pentes sont exprimées en degrés. L'indice entre parenthèses correspond au nombre de borne par classe.

4.5. MISE EN EVIDENCE DE LA RELATION PLUIES / DEPLACEMENT

Une comparaison entre les cumuls des pluies journalières et les courbes de vitesses de déplacements permet d'affiner et confirmer la relation pluies / déplacements (Illustration 34, Illustration 35, Illustration 36, Illustration 37 et Illustration 38).

La corrélation entre les précipitations et les accélérations est délicate du fait du lissage des courbes de vitesses par la méthode des moyennes mobiles. A ce stade de l'étude, une corrélation à l'échelle journalière entre les phases d'accélération des glissements et la pluviométrie n'est pas envisageable. A l'inverse, à l'échelle annuelle, le phénomène de saisonnalité des variations de vitesses des glissements est largement mis en évidence. Après chaque épisode pluvieux intense intervenant lors de la saison des pluies, une accélération se produit. Elle est suivie par une décélération progressive qui se poursuit jusqu'à atteindre la vitesse minimale observée avant l'épisode pluvieux.

Entre les années 2011 et 2012, des réactions différentes se manifestent. Les accélérations sont plus importantes en 2012. On note même que sur les antennes MAG et IAVI ces accélérations étaient quasi-absentes en 2011. De fait, l'intensité des pluies semble corrélée aux accélérations. En 2012, elles sont plus marquées de même que les précipitations. Sur les trois stations météo étudiées, un différentiel entre 2011 et 2012 de presque 700 mm à Grand Ilet et Ilet a Vidot sur les quatre premiers mois de chaque année et de presque 1300 mm à Salazie est observé (Illustration 33).

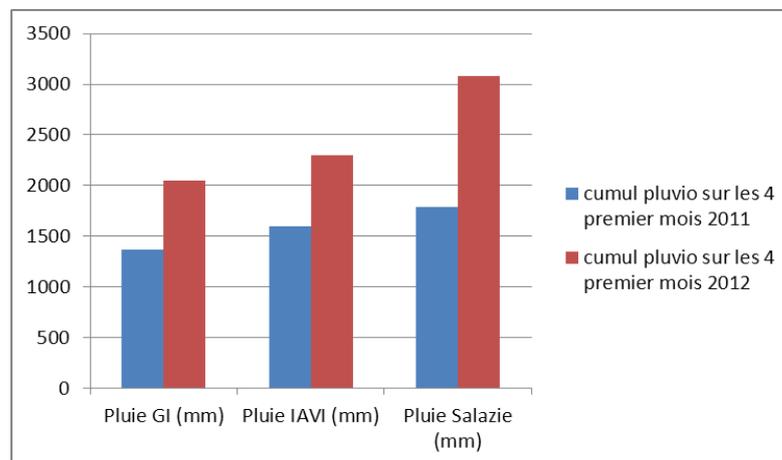


Illustration 33 : cumul des précipitation en mm sur les quatre premiers mois des années 2011 et 2012 pour les stations météo de Grand Ilet (GI,) Ilet a Vidot (IAVI) et Salazie.

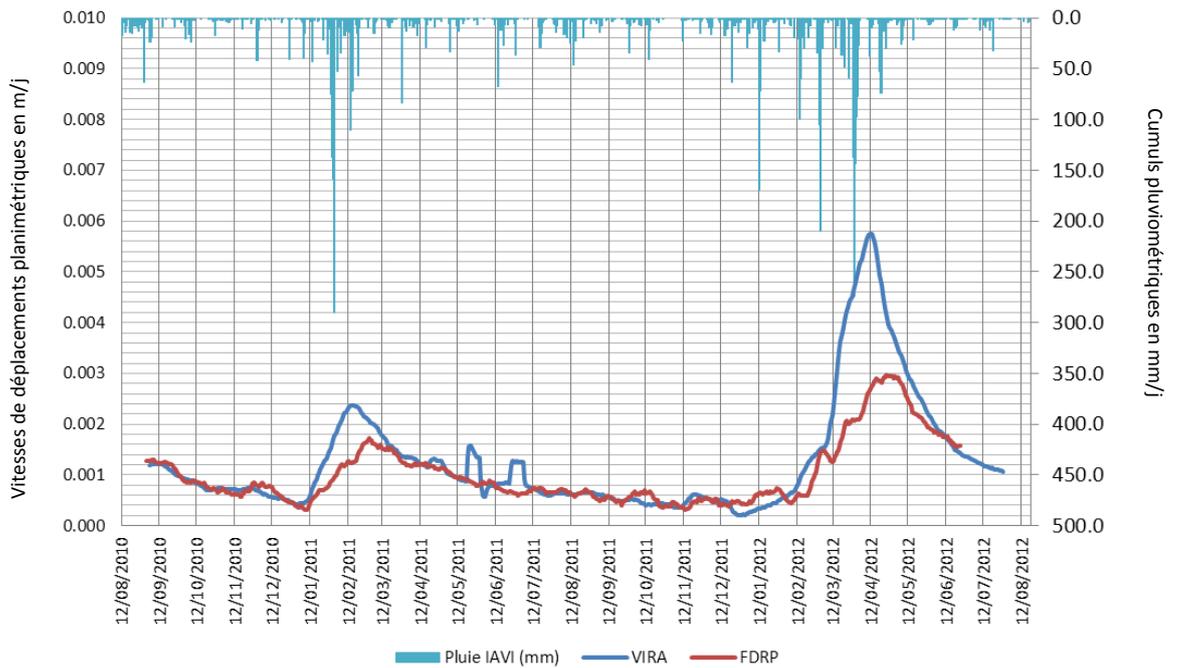


Illustration 34 : vitesses de déplacement en m/j des antennes du glissement de Fond de Rond-Point et cumul journalier des précipitations sur la station météo d'Ilet à Vidot.

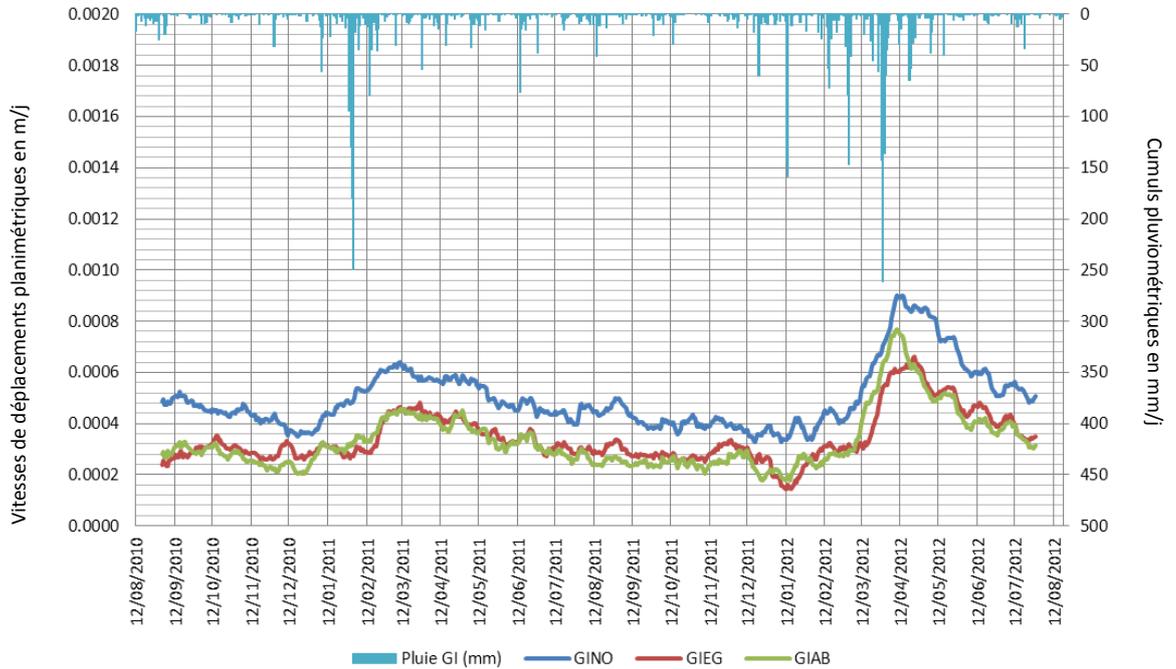


Illustration 35 : vitesses de déplacement en m/j des antennes du glissement de Grand Ilet et cumul journalier des précipitations sur la station météo de Grand Ilet.

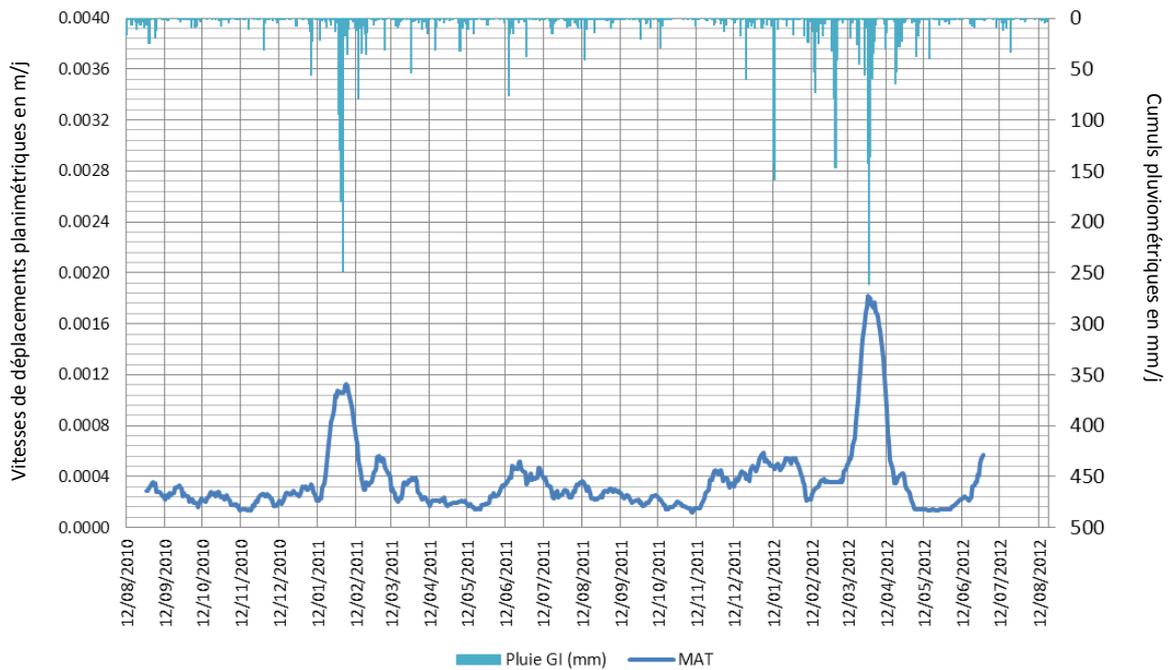


Illustration 36 : vitesses de déplacement en m/j des antennes du glissement de Maturin et cumul journalier des précipitations sur la station météo de Grand Ilet.

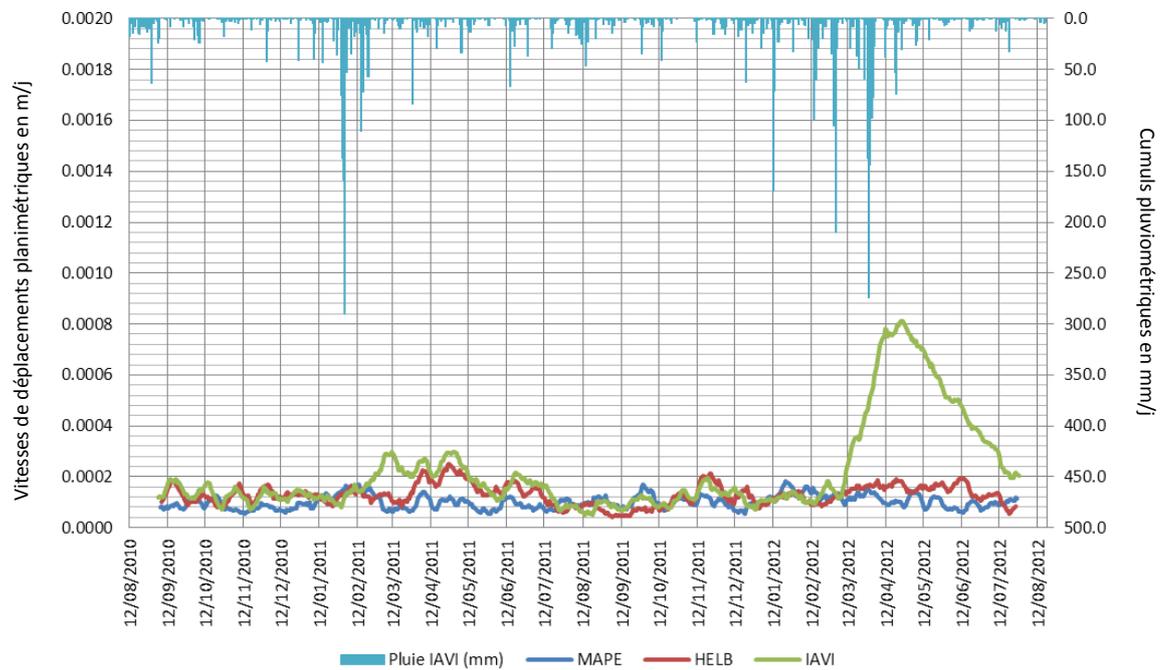


Illustration 37 : vitesses de déplacement en m/j des antennes MAPE, HELB et IAVI et cumul journalier des précipitations sur la station météo d'Ilet à Vidot.

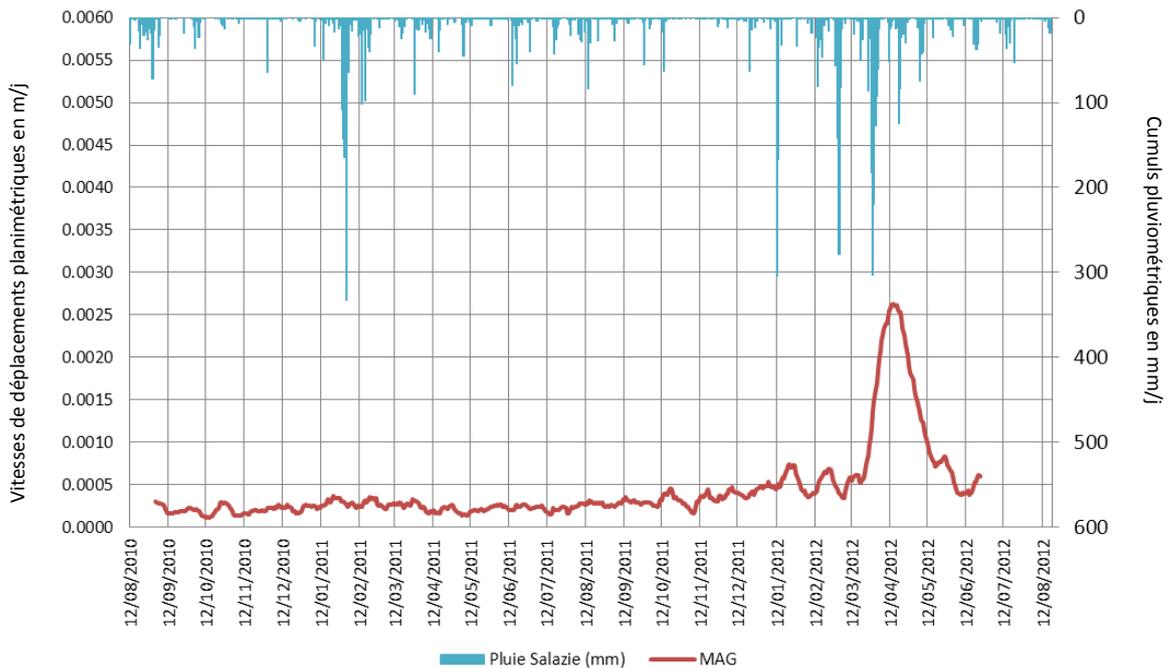


Illustration 38 : vitesses de déplacement en m/j des antennes du glissement de Mare à Goyave et cumul journalier des précipitations sur la station météo de Salazie.

4.6. CONCLUSION

Nos observations permettent de caractériser la géométrie des glissements du cirque de Salazie ainsi que la saisonnalité des variations de vitesses de déplacements.

- **Glissement de Fond de Rond-Point** : la masse en mouvement se déplace de manière homogène vers le nord à des vitesses moyennes annuelles proche de 1 m/an (maximales) en planimétrie et 0.3 m/an en tassement. L'inclinaison de son déplacement est de l'ordre de 13°. Son extension est voisine des 2 km².

Les vitesses montrent une dynamique temporelle saisonnière avec une accélération lors de la saison des pluies suivie par une décélération progressive. L'accélération intervient soudainement à la suite d'évènements pluvieux intense. En dehors des phénomènes favorisant l'accélération du glissement, sa vitesse minimale est légèrement inférieure à 0.2 m/an.

- **Glissement de Grand Ilet** : la masse en mouvement se déplace vers le nord-est en suivant une logique de croissance tête / pied. Les vitesses moyennes annuelles en tête de glissement sont inférieures à 0.1 m/an, en pied de glissement elles dépassent 0.5 m/an. L'inclinaison est de l'ordre de 15°. Son extension est proche de 2 km².

Les vitesses montrent une dynamique temporelle similaire à celle observée sur *Fond de Rond-Point*. La vitesse minimale est d'un peu moins de 0.13 m/an.

- **Glissement d'Ilet à Vidot** : la masse en mouvement se déplace vers le nord-nord-est à des vitesses variant de quelques cm à presque 0.2 m/an. Spatialement, aucune organisation ne ressort si ce n'est que le secteur nord est plus rapide. Son inclinaison est difficile à quantifier car très variable. En moyenne elle est de 45°.

La saisonnalité des variations de vitesse s'avère être fortement dépendante de l'intensité des événements pluvieux. Sa vitesse minimale est inférieure à 0.04 m/an.

- **Le glissement de Maturin** : il se déplace vers le sud avec des vitesses variables en fonction des secteurs qui semblent glisser indépendamment. Une érosion régressive très importante depuis la ravine Roche à Jacquot s'est produit lors des cyclones Diwa et Gamède. Elle est susceptible d'entraîner d'importante déstabilisation.

La dynamique temporelle se caractérise par de brèves accélérations suite aux événements pluvieux intenses. Sa vitesse minimale est de ~ 0.07 m/an.

- **Le glissement de Mare à Goyave** : il se déplace en direction du sud avec des vitesses supérieures sur la marge orientale : 0.1 contre 0.25 m/an. On observe également des directions qui ont tendances à diverger côté est pour la marge orientale est côté ouest pour la marge occidentale.

Seule la saison des pluies 2012 est marquée par une accélération forte est soudaine. Il semble que la saisonnalité soit sensible au-delà d'un certain seuil pluviométrique. Sa vitesse minimale est inférieure à 0.04 m/an.

5. Conclusion et perspective

Le suivi des réseaux géodésiques dans les cirques de La Réunion permet de :

1. identifier et localiser la présence de glissement de terrain sur le territoire que couvrent les trois cirques (Salazie, Cilaos et Mafate). La finesse de la localisation dépend de la densité du réseau de bornes géodésiques. Tous les secteurs n'étant pas couverts, certains peuvent échapper à l'étude. Cependant, dans la problématique 'risques mouvement de terrain', la couverture du réseau englobe l'ensemble les zones à enjeux. Cela implique que si des secteurs échappent à la couverture ils sont hors zones à enjeux.

Les mouvements observés concernent presque exclusivement le cirque de Salazie. Les cirques de Cilaos et Mafate ne sont pas ou très peu marqués par des déplacements. Si des mouvements les concernent, ils sont soit (i) trop lents pour être l'objet d'une mesure GPS (déplacement inférieur à la précision de la mesure GPS) ou (ii) il n'y a pas eu de manifestation de leur déplacements récents. Cette seconde observation est primordiale pour la poursuite des mesures. En considérant la relation pluies / déplacements et l'absence d'évènements pluvieux très intenses au cours de l'étude, la poursuite des mesures est essentielle pour détecter de futurs mouvements actifs.

2. démontrer la saisonnalité des vitesses de déplacements des glissements de terrains de grande ampleur. La dynamique saisonnière observée montre une accélération des glissements en saison des pluies suivie par une décélération progressive jusqu'à la vitesse initiale. Dans le détail, il semble que l'accélération intervient suite au dépassement d'un seuil pluviométrique. Le dépassement de ce seuil serait l'élément déclencheur de l'accélération. En effet, les observations montrent que (i) les glissements ne réagissent pas aux premiers épisodes pluvieux qui signifient le début de la saison humide et (ii) certains glissements ne réagissent pas à des saisons des pluies peu intenses.

L'analyse critique des données des réseaux géodésiques montre que la précision des mesures, centimétriques pour les mesures ponctuelles des bornes géodésiques et infracentimétriques pour les mesures permanentes, permet de caractériser finement les glissements de terrain. Cependant, une analyse plus poussée avec des méthodes spécifiques conforterait les résultats lèverait les interrogations encore présentes.

Deux points sont à développer :

1. La diminution du bruit sur les données de vitesse de déplacement via l'utilisation du logiciel de traitement de données GPS *GAMIT/GLOBK* développé dans le cadre d'étude de mouvements crustaux (de l'ordre de quelque centimètre par an). En effet, si la saisonnalité des variations de vitesses des mouvements de terrain est établie, ses variations, à l'échelle journalière, reste difficile à appréhender.

2. Le suivi spatial via le réseau de bornes géodésiques, initié en 2003, apporte de nombreux éléments de réponses à l'étude des mouvements de terrain de grande ampleur mais de manière 'partiel'. A titre d'exemple, à Mafate, la quasi-absence de mesure de mouvement de terrain de grande ampleur est limitée aux secteurs couverts par la présence de bornes. De la même manière, à Salazie, la caractérisation de la géométrie des glissements ne peut être strictement établie à défaut de bornes couvrant des secteurs clés. Le glissement de Grand ilet, avec une croissance des vitesses tête / pied pose la question d'un partitionnement en différents ensembles glissants plus ou moins vite suivant leur positions. Fin 2012, une première campagne de mesures a été réalisée dans le but de lever cette interrogation et délimiter ces ensembles. Les glissements de Grand Ilet et Fond de Rond-Point ont fait l'objet de plusieurs mesures GPS disposées en transect parallèle et perpendiculaire à l'axe des glissements. Les résultats seront exposés suite à la seconde campagne de mesures en juin 2013.

Annexes sur CD

Annexe 1 : tableau de suivi du réseau de bornes géodésiques. Voir le fichier *suivi.xls*.

Annexe 2 : tableau de calcul des déplacements des bornes géodésiques. Voir le fichier *calcul.xls*.

Annexe 3 : tableau de calcul des déplacements des bornes géodésiques sur la plus longue période d'enregistrement. Voir le fichier *dép. sur période max.xls*.

Annexe 4 : tableau présentant une analyse des mouvements des bornes géodésiques fondé sur l'observation de graphes de déplacements et de tassements orthonormés. Voir le fichier *analyse.xls*.

Annexe 5 : tableau filtrant les enregistrements considérés comme aberrants. Voir le fichier *données lissées.xls*.

Annexe 6 : tableau de calcul du lissage des courbes de vitesse de déplacement par la méthode des moyennes mobiles et graphes présentant les courbes de vitesse pour chaque glissement. Voir fichier *données lissées.xls*.

Annexe 7 : tableau de calcul des incertitudes de déplacement plan, 3D, tassement vertical, pendage et orientation



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Centre scientifique et technique

3, avenue Claude-Guillemin
BP 36009
45060 – Orléans Cedex 2 – France
Tél. : 02 38 64 34 34

BRGM Réunion

5, rue Sainte Anne
CS 51016
97404 – Saint-Denis
Tél. : 02 62 21 22 14