

DEPARTEMENT DE SUIVI
DES CENTRES D'EXPERIMENTATIONS NUCLEAIRES

**SURVEILLANCE DE L'EVOLUTION
GEOMECANIQUE DE MURUROA**



TOME II
EVOLUTION GEOMECANIQUE
Bilan 2010 de l'évolution géomécanique
des atolls de Mururoa et de Rangiroa



Direction des applications militaires
Centre DAM Île de France
Département analyse, surveillance, environnement
Service laboratoire de détection et de géophysique

énergie atomique • énergies alternatives

CEA/DIF/DASE/LDG
DO 110

19/03/12



12RRBE000194

Diffusé le 22/03/12

SURVEILLANCE DE L'ATOLL DE MURUROA

EVOLUTION GEOMECANIQUE

BILAN 2010

A-24100-00-11-PW-22

Date d'émission : 19 mars 2012

Nombre de pages : 58

Le Chef du D.A.S.E.

Le Chef du L.D.G.

C.E.A. -D.A.M.

FICHE DOCUMENTAIRE

DAM





<p>1 - Organisme Emetteur* Centre : DIF Direction : Ile de France Département : DASE Service : LDG</p>	<p>2 - Classification * DO * ** SDNP, SD, CD, SC, CI, CC, DR, DO</p>		
	<p>3 - Référence à Mururoa Projet Surveillance du site de EOTP A-24100-00-11-PW-22</p>		
<p><u>IDENTITE DU DOCUMENT</u></p>			
<p>4 - Nature R</p>	<p>5 - Identification Document Secret Autres documents 110/2012/DO</p>	<p>6 - Date 19/03/2012</p>	<p>7 - Nbre de pages 58</p>
<p>8 - Auteur (s) :</p>			
<p>9 - Titre SURVEILLANCE DE L'ATOLL DE MURUROA - EVOLUTION GEOMECANIQUE- BILAN 2010</p>			
<p>10 - Résumé Ce rapport présente le bilan annuel pour l'année 2010 de l'évolution géomécanique des atolls de Mururoa et de Fangataufa, anciens sites d'expérimentation du Pacifique, et de l'atoll de référence de Rangiroa. Ce bilan est effectué à partir des données acquises par le système de Télésurveillance TELSITE mis en place en 1997 et intègre un rappel des résultats de la campagne topographique 2007. Des perspectives d'action 2011-2016 sont présentées.</p>			
<p>11 - Descripteur (s) proposé (s) Mots Clés : Mururoa, Fangataufa, Rangiroa, Telsite, Géomécanique, Télésurveillance, Campagne topographique.</p>			

* Sigles de la circulaire DAM/DRIF/Y n° 61 du 2/1/97

SURVEILLANCE DE L'ATOLL DE MURUROA

EVOLUTION GEOMECANIQUE

BILAN 2010

	REDACTEURS	APPROBATEURS		EMETTEUR
		TECHNIQUE	QUALITE	
NOM				
UNITE	DASE/LDG/DSO DASE/LDG	DASE/LDG/DSO	DASE/LDG	DASE/LDG
DATE DU VISA	20.03.2012	21.3.12	20/03/2012	20/3/12
VISA				

CARTOUCHE DES EVOLUTIONS			
INDICE	DATE	REDACTEUR	MOTIF ET NATURE DES EVOLUTIONS
A	26/05/2011		Edition Initiale
B	19/03/2012		Révision après prise en compte des remarques de la C3S

SURVEILLANCE DE L'ATOLL DE MURUROA-EVOLUTION GEOMECANIQUE

BILAN 2010

SOMMAIRE

1.	RESUME.....	5
2.	RAPPELS.....	6
2.1.	Le suivi continu de l'évolution de Mururoa : le système TELSITE.....	6
2.2.	Rappel des composantes du système TELSITE.....	7
2.3.	Exigences en matière de fonctionnement du système TELSITE.....	8
2.4.	Les campagnes complémentaires de caractérisation de l'évolution des atolls.....	8
3.	BILAN DE L'EVOLUTION GEOLOGIQUE MESUREE EN 2010.....	12
3.1.	Bilan de l'évolution de la zone nord-est de Mururoa issu des données TELSITE.....	12
3.2.	Bilan de l'évolution des autres zones de Mururoa issu des données TELSITE.....	31
3.3.	Synthèse des résultats de la campagne topographique quinquennale 2007.....	34
3.4.	Interprétation.....	36
3.5.	Réflexion sur le remplacement des capteurs défectueux.....	37
3.6.	Campagne de photographie haute résolution par imagerie aérienne.....	38
3.7.	CONCLUSIONS POUR LE BILAN GEOMECANIQUE 2010.....	40
4.	BILAN DE FONCTIONNEMENT DU SYSTEME TELSITE POUR L'ANNEE 2010.....	41
5.	PERSPECTIVES 2011-2015 : MAINTENANCE, ETUDES.....	43
5.1.	Entretien des installations TELSITE.....	43
5.2.	Réflexion sur le remplacement des capteurs défectueux.....	44
5.3.	Compléments de calculs d'effets hydrauliques.....	44
5.4.	Veille scientifique en imagerie satellitaire.....	44
5.5.	CONCLUSION POUR LES PERSPECTIVES.....	45
6.	BILAN D'INSTRUMENTATION DE L'ATOLL DE REFERENCE RANGIROA SUR 7 ANS.....	46
6.1.	Rappel des objectifs.....	46
6.2.	Bilan de sismicité de janvier 2003 à fin 2010.....	48
6.3.	Bilan de sismicité locale à Rangiroa en 2010.....	50
6.4.	CONCLUSION POUR L'ATOLL DE REFERENCE.....	51
7.	LISTE DES FIGURES.....	52
8.	REFERENCES.....	55
8.1.	Rapports et ouvrages.....	55
8.2.	Bibliographie.....	57

1. Résumé

Dans le cadre de la surveillance des atolls de Mururoa et Fangataufa, ce rapport présente le bilan annuel 2010 de l'évolution géomécanique, effectué à partir des mesures continues acquises par le système de télésurveillance TELSITE mis en place à Mururoa depuis 1997. Les résultats de la campagne topographique réalisée en 2007 sont rappelés. Le dispositif de surveillance comprend des capteurs permettant des mesures de l'activité sismique, des mesures de déplacement en surface (capteurs GPS) ainsi que des mesures en profondeur (câbles en forages inclinés, inclinomètres). Un bilan de fonctionnement et les lignes directrices des perspectives d'étude ou d'évolution sont présentées. Les observations sismiques acquises pour l'atoll de référence Rangiroa sont également reportées.

L'activité microsismique en 2010 en zone nord-est de Mururoa demeure à un niveau constant en nombre d'événements et en magnitude. Elle se manifeste plus fréquemment en zone Française, à la limite ouest de la zone en évolution. La répartition de la sismicité reste similaire à celle observée antérieurement au système TELSITE, et ne traduit pas d'évolution particulière de la géométrie de ces zones depuis la fin des essais. Cependant, le maintien de cette activité dans le temps en zone Française montre que la stabilité définitive de celle-ci n'est pas encore acquise.

Les déplacements superficiels verticaux et horizontaux mesurés montrent que le mouvement vers l'océan de la zone Camélia observé depuis le début des mesures (1983) se poursuit. Les mesures sont minimales dans les autres zones. Excepté en quelques points très localisés, les résultats des données continues complétés de ceux de la campagne topographique 2007, dénotent un ralentissement global progressif ou la stagnation des vitesses de déplacement en surface en zone nord.

Les instruments de mesures de déplacements en profondeur vieillissants ne donnent plus que des informations parcellaires. Celles-ci restent à des valeurs faibles en absolu et ne montrent pas de changement de tendance en 2010. L'évolution se maintient à un niveau déjà observé ou stationnaire depuis 2005.

Ces mesures montrent que le mouvement reste *globalement* cohérent avec les prévisions d'un mouvement progressivement plus lent depuis la fin des essais, mais que celui-ci reste néanmoins mesurable.

L'activité géomécanique actuelle de l'atoll de Mururoa justifie un maintien de la vigilance au niveau actuel et la nécessité de maintenir l'ensemble des capteurs en place, à objectifs inchangés.

2. Rappels

Après l'arrêt des essais en 1996, la surveillance des atolls a été réduite au minimum nécessaire pour assurer la sécurité des personnes présentes à Mururoa et contrôler que l'évolution du site reste conforme aux prévisions. Elle comprend deux volets essentiels : le suivi continu d'indicateurs représentatifs de l'évolution du massif géologique et la réalisation périodique de campagnes d'observation offrant une vue plus globale de l'évolution de Mururoa.

L'atoll de Fangataufa, où aucun mouvement ou dégradation majeurs n'ont été mis en évidence, ne nécessite pas, quant à lui, le maintien d'une surveillance en continu (réfs. 1, 2, 3, 8). Une campagne d'observation périodique a été jugée suffisante.

2.1. *Le suivi continu de l'évolution de Mururoa : le système TELSITE*

Le suivi continu concerne donc uniquement Mururoa où les effets des expérimentations ont été les plus importants. Au nord-est de cet atoll en effet, une déformation lente de la pente externe a été mise en évidence dès la fin des années 70. Ce phénomène fait depuis, l'objet d'une surveillance instrumentale. Bien que ce mouvement soit lent, un glissement de masse important ne peut toujours pas être écarté et il reste indispensable de connaître en temps quasi réel toute évolution pouvant mettre en jeu la sécurité des personnes se trouvant sur place, ou sur les atolls voisins.

Ce suivi repose sur un dispositif baptisé TELSITE (TELé-surveillance du SITE). Ce système, entièrement automatique, transmet ses mesures et diagnostics en métropole par liaisons satellite, et ne nécessite par conséquent aucun personnel spécifique sur place à Mururoa.

La première mission du système TELSITE est de couvrir le risque dit « à 90 secondes », c'est-à-dire le risque créé par le déferlement très localisé d'une vague qui aurait été générée par l'effondrement soudain d'un pan de falaise corallienne. Un tel effondrement s'accompagne de vibrations qui sont enregistrées par des capteurs sismiques installés sur le pourtour de l'atoll. Entre le moment où ces vibrations sont enregistrées et celui où une vague pourrait se former, il s'écoule un temps suffisant pour que les personnes exposées puissent se mettre à l'abri. Dans une telle éventualité, le système TELSITE est conçu pour envoyer automatiquement une alerte en direction des personnes présentes sur site et vers les géophysiciens du Département Analyse, Surveillance, Environnement (DASE) du CEA en métropole. Les personnes présentes sur site doivent alors appliquer les consignes de sécurité adéquates, jusqu'à ce que l'alerte ait été analysée, traitée et levée par les spécialistes du DASE à partir de la métropole. Une simulation mensuelle en vraie grandeur permet de s'assurer du fonctionnement correct de la chaîne d'alerte. Cette alerte automatique en temps réel repose donc exclusivement sur le réseau sismique.

Par ailleurs, des mesures permettant d'apprécier l'évolution géomécanique de l'atoll sont réalisées par le système TELSITE. Elles sont envoyées automatiquement en métropole où elles sont analysées et interprétées. Ces analyses ont pour objectif de vérifier que l'évolution géomécanique ne présente pas de

changement de tendance et qu'elle reste conforme aux prévisions. Les mesures automatiques disponibles ne permettent pas en effet de dresser un bilan aussi fin de l'activité géologique que par le passé. Si le diagnostic révèle une évolution anormale, des observations et analyses complémentaires sont décidées et des mesures de protection spécifiques sont prises sur site et pour les atolls voisins. Ces dispositions font l'objet d'un groupe de travail mis en place par le DSND¹.

Des signes avant coureurs d'une éventuelle déstabilisation de plus grande ampleur et d'évolution plus lente qu'un effondrement de falaise pourraient être repérés plusieurs mois à l'avance grâce au suivi et à l'analyse des données de surveillance. Les dispositions de protection des personnels et des biens pourraient donc avoir été prises bien avant l'occurrence du phénomène. L'ensemble des mesures réalisées est synthétisé sous forme d'un indicateur appelé vitesse relative (VR), quantité sans dimension permettant de comparer la vitesse d'évolution actuelle à une vitesse de référence. Cette vitesse relative est ensuite traduite en niveaux de risque, eux-mêmes associés à un délai de préavis d'événement de grande ampleur (Tableau 1) :

TABLEAU I : NIVEAUX DE RISQUE VIS-A-VIS D'UN EBOULEMENT DE GRANDE AMPLEUR

Niveau 0	$VR < 2$	Situation normale
Niveau 1	$2 < VR < 6$	Situation réversible. Pas de risque immédiat.
Niveau 2	$6 < VR < 12$	Situation réversible. Préavis supérieur à une semaine.
Niveau 3	$VR > 12$	Situation irréversible. Préavis supérieur à 1 jour.

2.2. Rappel des composantes du système TELSITE

Le système de surveillance automatique permet :

- La mesure des déplacements en surface par géodésie spatiale (GPS différentiel) : Une station de référence et 5 stations installées au bout de digues s'avancant vers l'océan dans la zone nord-est.
- La mesure des mouvements sur les flancs par câbles ancrés dans des Forages Inclinaux Latéraux (F.I.L.) : un site dans chacune des zones Irène, Camélia et Françoise.
- La mesure des déformations en profondeur par inclinométrie en puits : un forage équipé au centre de la zone Camélia.
- La mesure continue de l'activité microsismique globale par des sismographes en surface et des géophones en profondeur : 6 stations sismiques dont 4 en profondeur ainsi que 2 stations de surface de secours.

¹ Délégué à la Sûreté Nucléaire et à la radioprotection pour les installations intéressant la Défense.

- Trois capteurs de submersion (zones Anémone, Irène et Viviane) complètent le dispositif. Ils sont destinés à mesurer la hauteur des vagues qui résulteraient d'un éboulement.

La répartition géographique de cette instrumentation en zone nord-est et son exploitation sont rappelées sur les Figures 1 à 4.

2.3. Exigences en matière de fonctionnement du système TELSITE

Malgré les problèmes que pose le maintien en état d'équipements dans un environnement corrosif et isolé, le système doit être à chaque instant à même d'assurer ses missions. Il faut donc qu'il y ait en permanence un certain nombre de stations sismiques en état pour que l'alerte à 90 secondes soit assurée. De la même façon, les capteurs de déformation doivent fonctionner en nombre suffisant pour que la détection d'un changement éventuel d'évolution soit possible.

Une maintenance préventive très limitée est assurée par les personnels militaires présents à Mururoa. Les maintenances préventive et curative de premier et deuxième niveau sont assurées par du personnel du Département Analyse, Surveillance, Environnement du CEA (en provenance soit de l'antenne DASE de Tahiti, soit de Métropole), avec une assistance logistique légère des Armées sur site (réfs. 4 et 5).

La durée de vie de ce système de surveillance continue, mis en service opérationnel au début de l'année 1997 a été estimée à 10 ans environ. C'est pourquoi une refonte, partielle, du système a été entreprise et réalisée en octobre 2005. Cette rénovation a concerné une partie des segments d'acquisition et de transmission du système, ainsi que le remplacement des capteurs de surface GPS. Le système rénové permet, depuis, la transmission en temps quasi réel des signaux de l'ensemble des stations sismiques en cas d'événement, ainsi que ceux des capteurs de submersion. Par ailleurs, cette rénovation n'a concerné que les installations de surface, mais, à objectifs inchangés, une jouvence de l'instrumentation en profondeur (FIL, géophones et inclinomètres) apparaît également nécessaire et a fait l'objet de premières réflexions (réfs. 23, 25). Ce sujet fait partie des thèmes traités par le groupe de travail mis en place par le DSND.

2.4. Les campagnes complémentaires de caractérisation de l'évolution des atolls

Si les mesures fournies par TELSITE sont suffisantes pour détecter un changement dans l'évolution géologique de Mururoa, elles ne permettent cependant pas une caractérisation complète de l'état de cet atoll et ne donnent aucune indication concernant Fangataufa. Un suivi complémentaire est donc nécessaire. Il prévoit des campagnes d'observations dont la périodicité envisagée est de l'ordre de 5-6 ans. La dernière campagne topographique a eu lieu fin 2007.

Ces campagnes, d'une durée de quelques semaines, sont définies et organisées par le Département Analyse, Surveillance, Environnement du CEA, en collaboration avec le Département Suivi des Centres d'Expérimentations Nucléaires (DSCEN) de la DGA. L'assistance logistique des personnels militaires présents sur site, ou plus généralement en Polynésie, est nécessaire. Les matériels spécifiques de mesures sont amenés de la métropole (réf. 1).

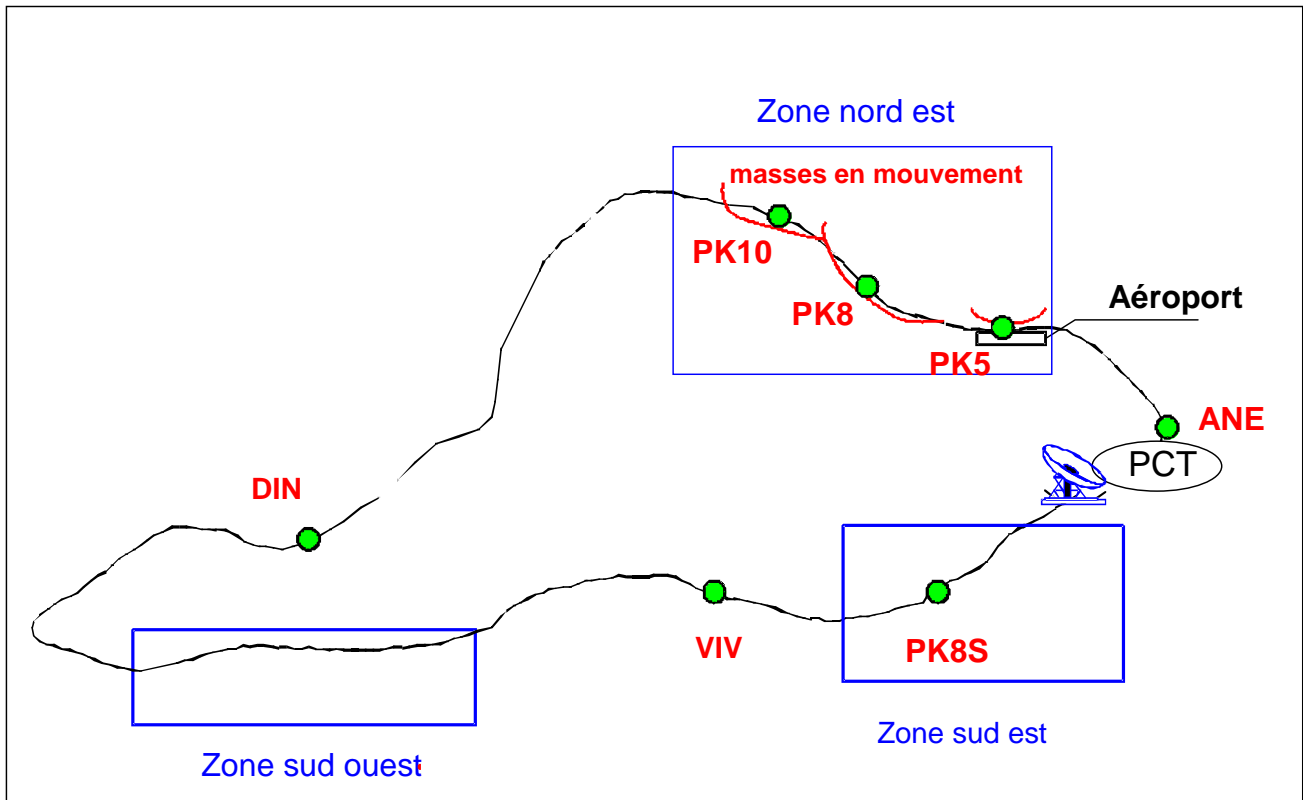


Figure 1 : Carte de l'atoll de Mururoa avec les zones surveillées et les points instrumentés.

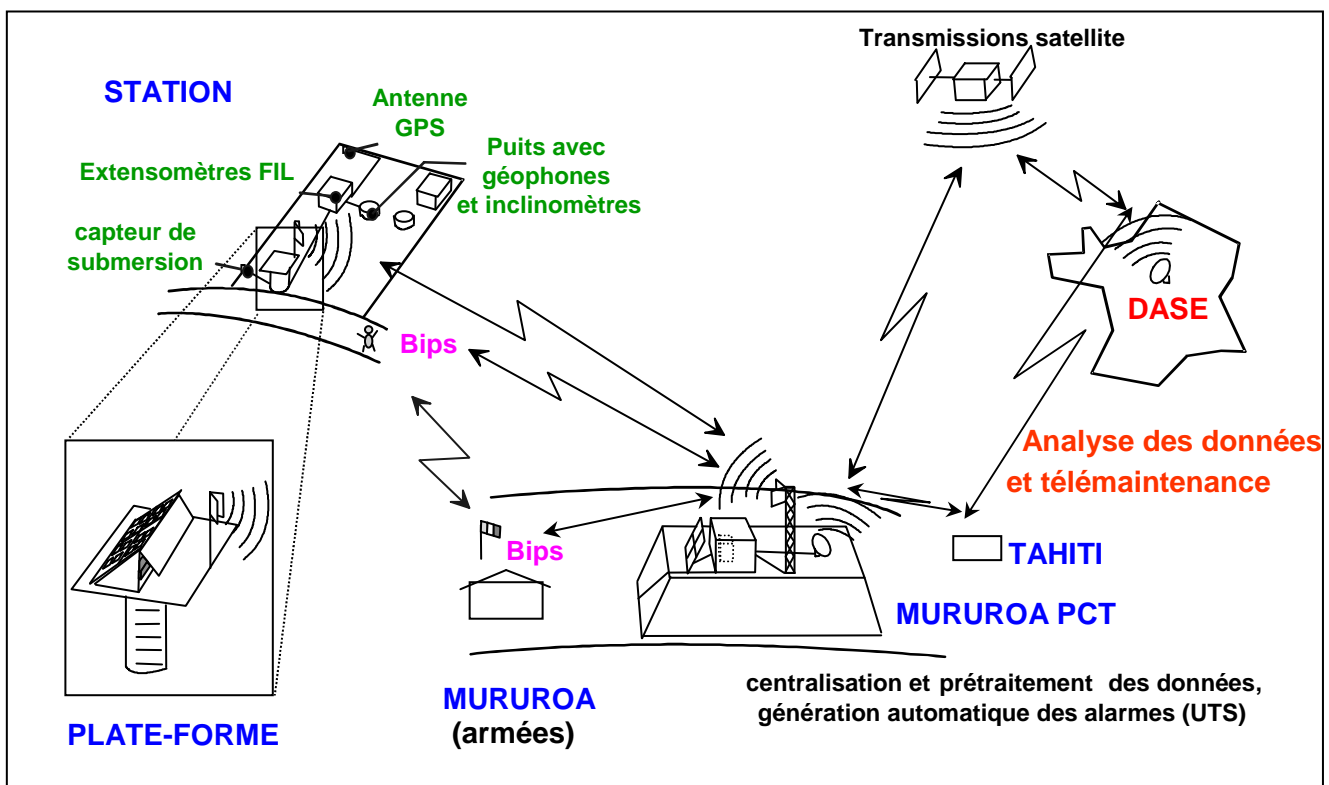


Figure 2 : Schéma général du fonctionnement du système de surveillance automatique TELSITE.

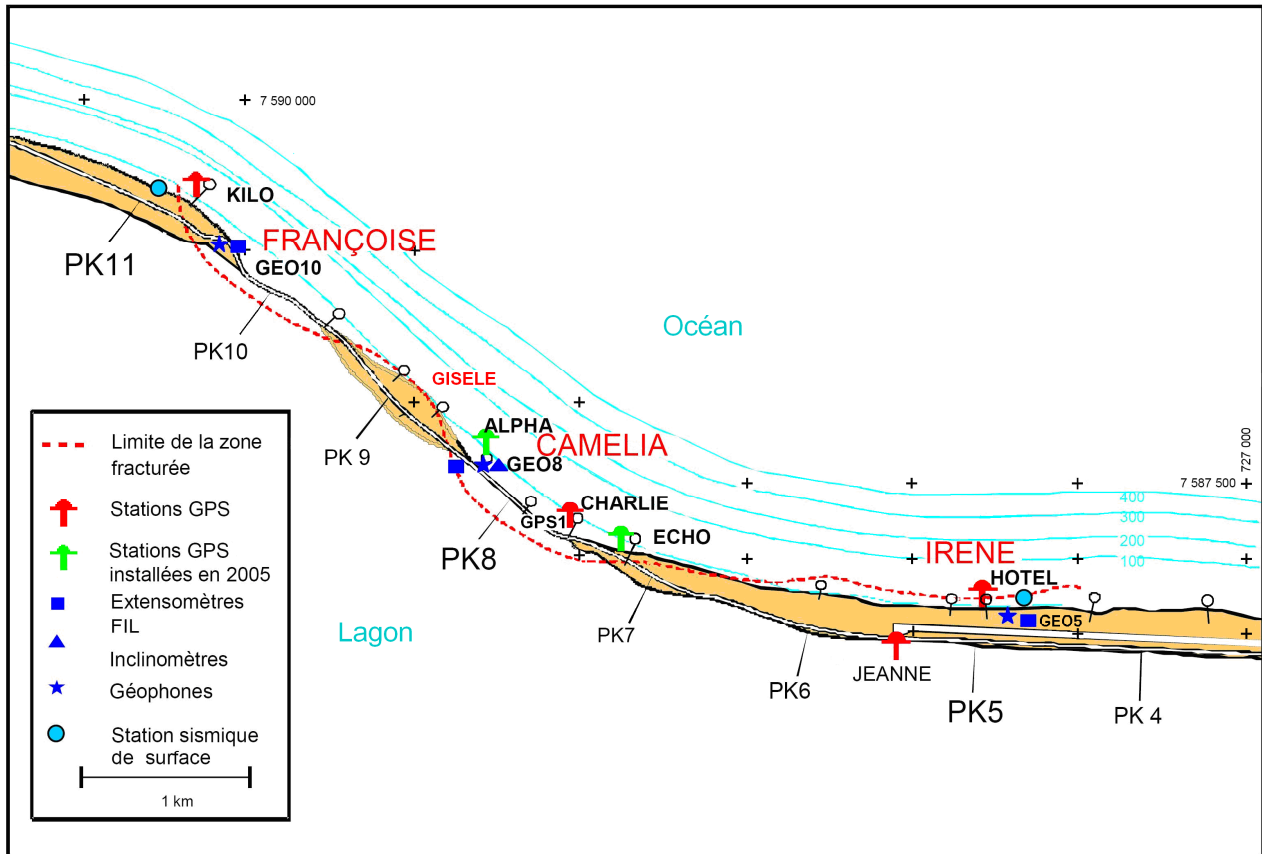


Figure 3 : Détail de l'implantation de l'instrumentation de la zone nord-est de Mururoa. Les traits gris terminés d'un cercle côté océan représentent la position des digues.

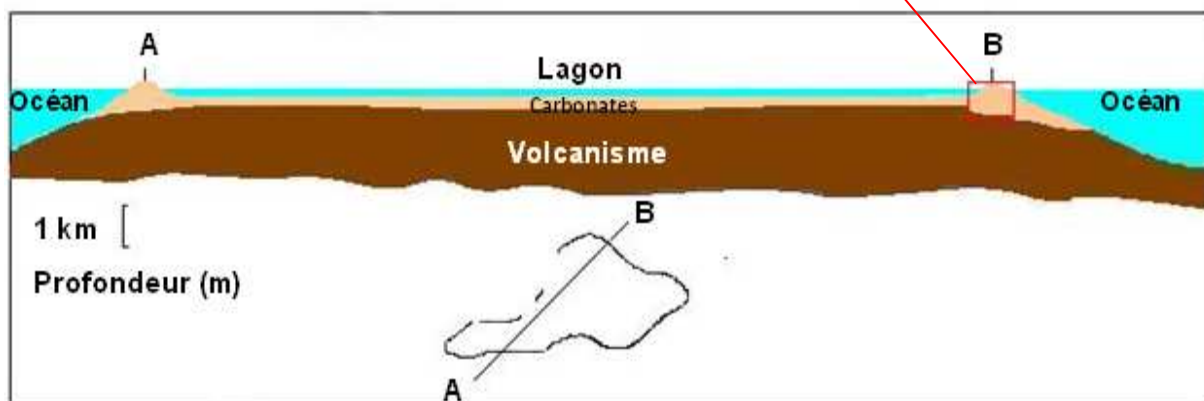
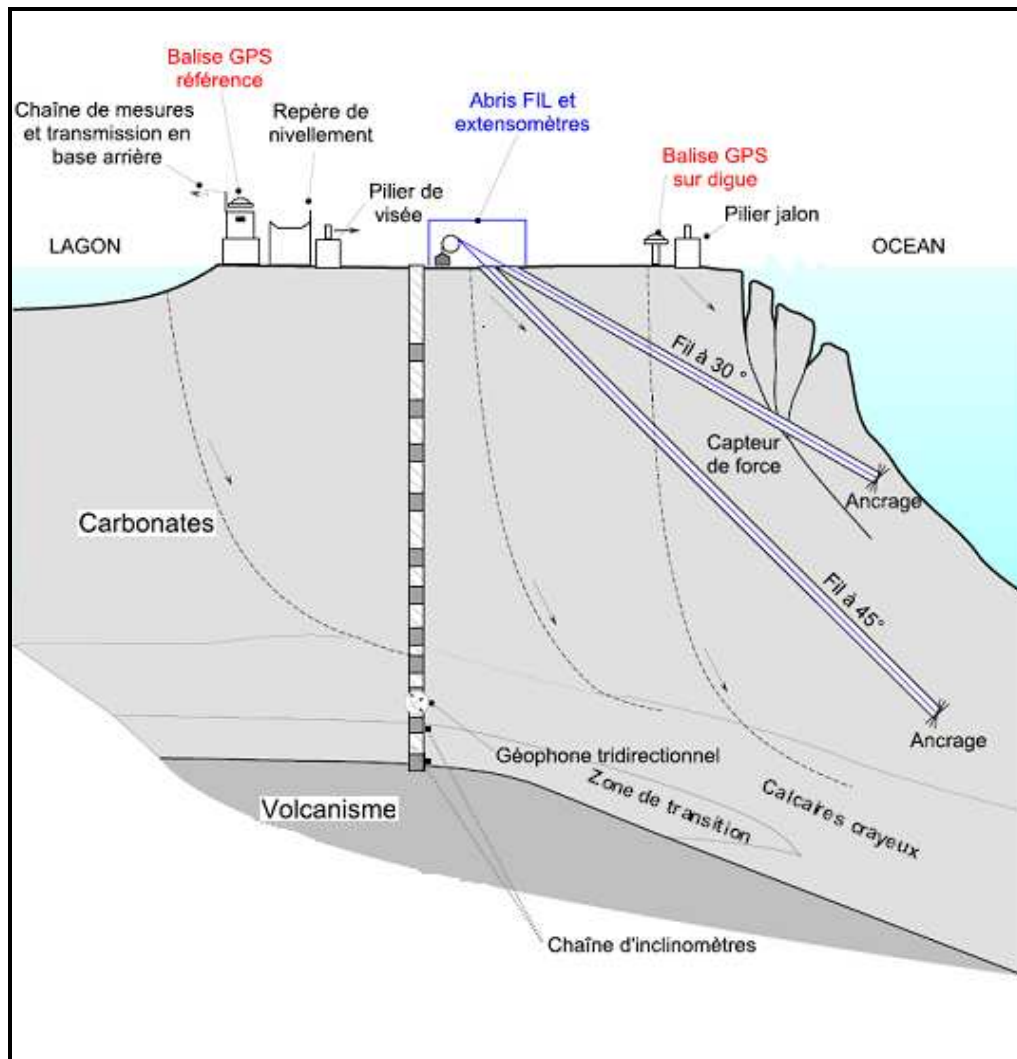


Figure 4 : Coupe représentant les principaux types de mesures réalisées en zone nord-est à Mururoa par le système TELSITE. Les déplacements en surface sont mesurés par les stations GPS. Les mesures de l'activité sismique sont effectuées par 4 géophones en profondeur et 2 stations sismiques en surface. Les mesures de déformation des flancs en profondeur sont effectuées par les câbles implantés en Forages Inclines Latéraux (FIL) et par la chaîne inclinométrique. Les courbes en pointillés figurent des limites hypothétiques (de principe) des zones en mouvement.

3. Bilan de l'évolution géologique mesurée en 2010

3.1. Bilan de l'évolution de la zone nord-est de Mururoa issu des données TELSITE

3.1.1. Activité sismique

Les événements sismiques détectés de manière automatique par le système TELSITE font l'objet d'un tri en différé par un analyste, permettant d'identifier parmi eux, ceux qui peuvent être associés à des événements locaux. Un secteur géographique leur est attribué systématiquement en fonction des stations qui ont détecté en premier l'événement (« Irène », « Camélia », « Françoise », « Gisèle » pour la zone nord).

Les événements les plus couramment observés sont de type « relâchement de contrainte », terme désignant un séisme de faible magnitude, non ressenti, qui résulte de la libération soudaine et rapide des contraintes accumulées par les masses rocheuses sous l'effet des mouvements lents des flancs de l'atoll. D'autres types d'événements sismiques locaux peuvent également se produire, comme des chutes de falaise, des glissements de terrain ou des éboulements qui peuvent donner lieu à des signaux plus longs et plus complexes.

Comme pour les années précédentes, l'activité sismique enregistrée par les stations de surface et de profondeur s'est manifestée en 2010 plus particulièrement dans la zone Françoise, avec 20 événements détectés (Figure 5), mais en diminution depuis 2006 dans ce secteur. Aucune alerte n'a été déclenchée en 2010.

En zone Irène, l'activité sismique, qui avait connu un pic en 2004, reste à un niveau moyen en 2010 en nombre d'événements (14) et en amplitude.

Globalement, l'activité sismique en zone nord est restée faible en 2010 avec un nombre moyen de relâchements de contrainte de l'ordre de un événement par semaine (Figure 5) ce qui correspond à un niveau habituel (tableau 2). Les courbes du nombre cumulé d'événements par zones en fonction du temps (Figure 7) dénotent la poursuite d'une évolution stationnaire depuis début 2007 en zone Françoise.

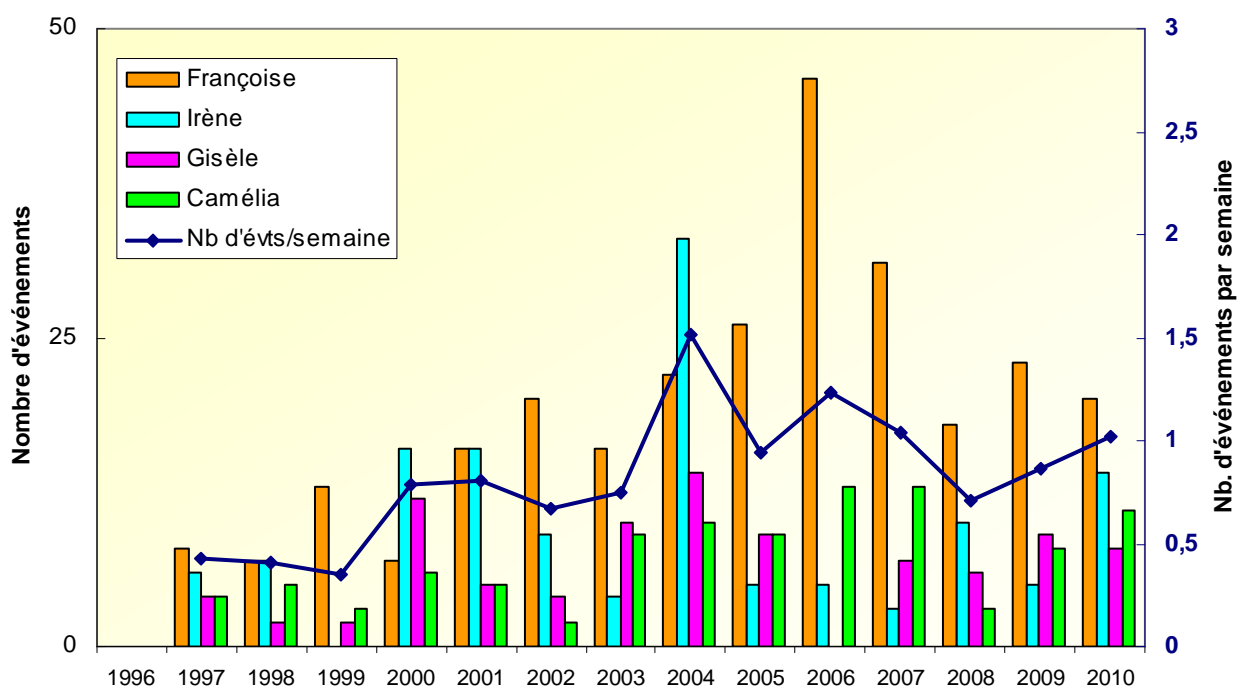


Figure 5 : Répartition de l'activité sismique en zone nord-est par zone et par année (barres) et nombre d'événements par semaine (courbe bleue).

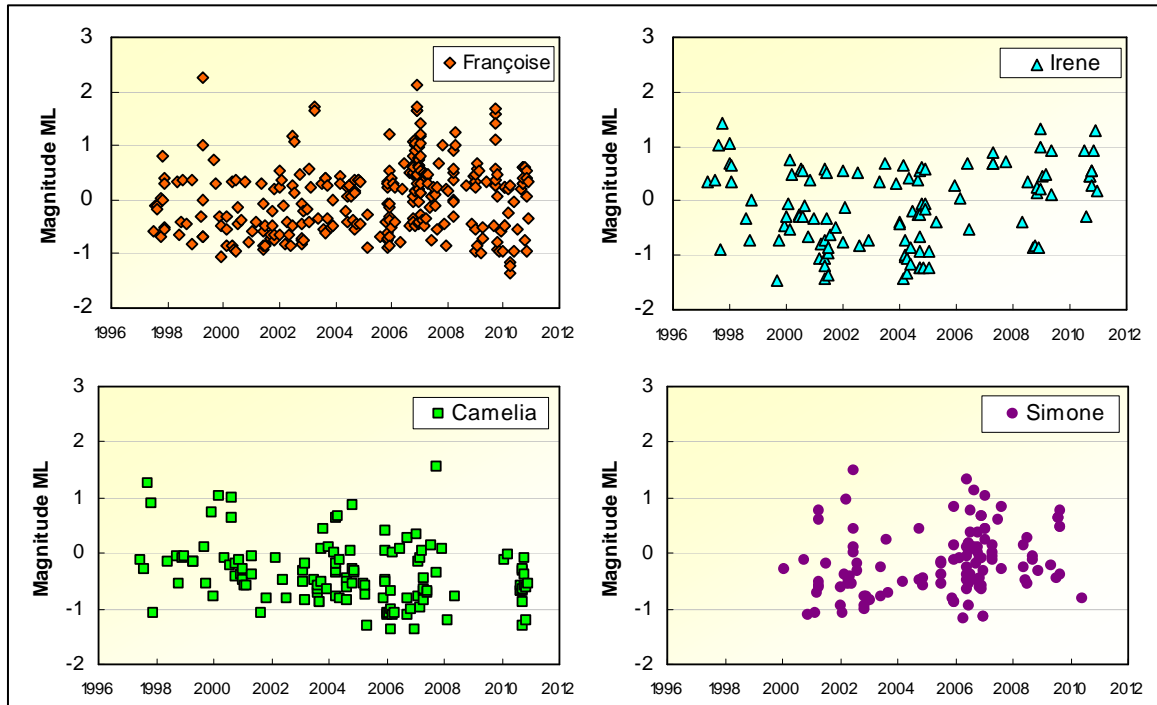


Figure 6 : Répartition temporelle par zone géographique, des magnitudes locales ML déterminées à partir des amplitudes automatiques des relâchements de contrainte détectés. Les événements attribués à la zone Gisèle sont répartis dans les zones Françoise ou Camélia. Le diagramme des magnitudes correspondant à la zone sud-est (Simone), est également présenté.

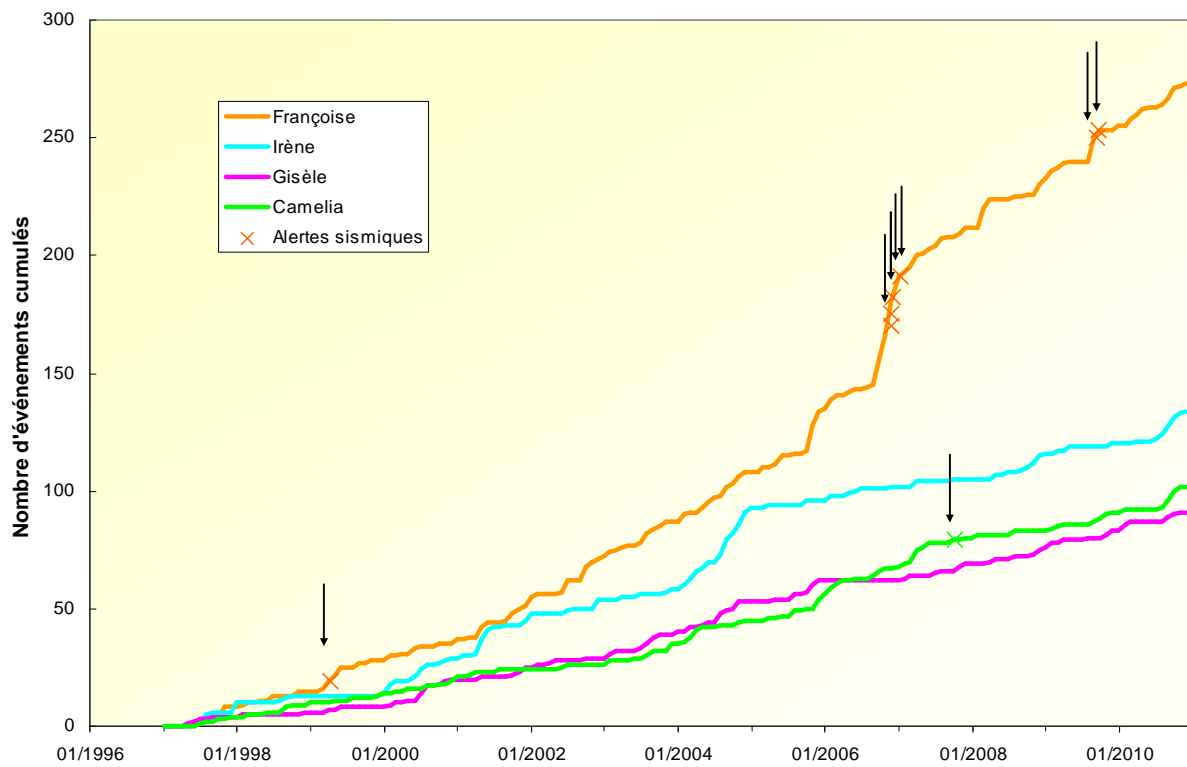


Figure 7 : Courbes du nombre d'événements cumulés par zones en zone nord-est de 1997 à fin 2010. Les flèches indiquent les occurrences des événements ayant déclenché des alertes.

3.1.2. Répartition des amplitudes des événements sismiques :

La gamme de magnitude ML des événements détectés par le système Telsite s'échelonne entre les valeurs -1,47 et 2,3 pour la zone nord. La magnitude est inférieure ou égale à ML = 1 pour 94% d'entre eux (Figure 8), soit des valeurs correspondant au domaine microsismique.

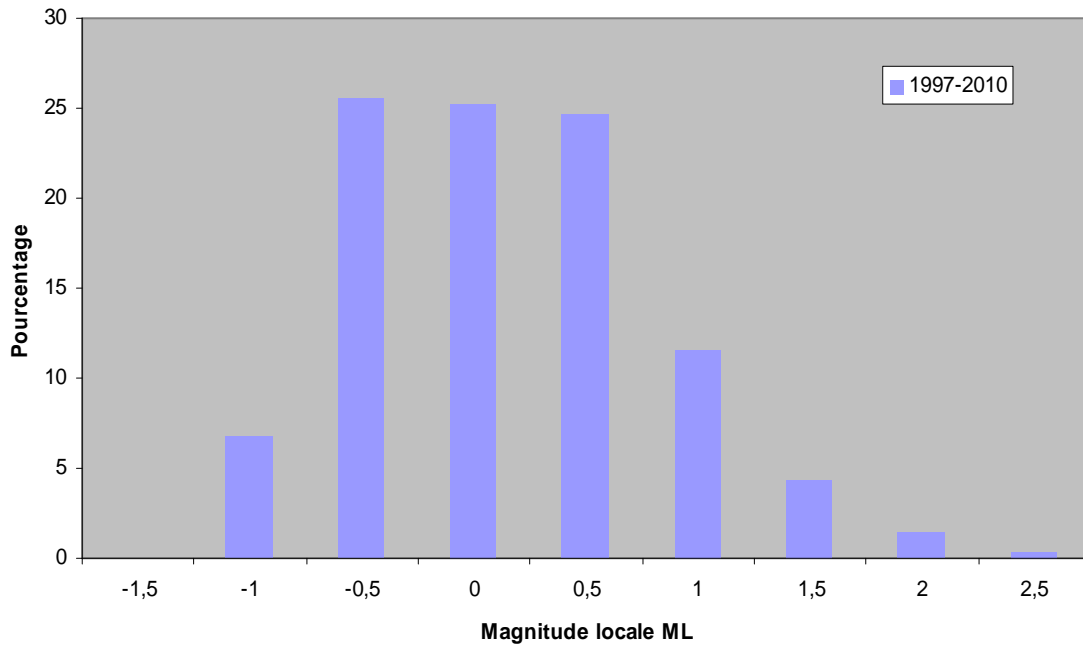


Figure 8 : Distribution du nombre de relâchements de contrainte (en pourcentage) détectés en zone nord par le réseau TELSITE sur la période 1997- 2010, en fonction de leur magnitude locale ML.

Energie

L'énergie sismique libérée lors d'un événement sismique est calculée par la relation :

$$E = 5.10^{-5} Mo \text{ (Kanamori 1977)} \quad (1)$$

où E est l'énergie en erg et Mo le moment sismique en dyne.cm.

avec M_0 déduit de la relation :

$$\text{LOG} (Mo) = 16.3 + 1.39 \text{ ML} \quad \text{(Thatcher et Hanks, 1973) (2)}$$

D'autres relations existent pour l'estimation de E, exprimée notamment à partir de la magnitude :

$$\text{LOG}(E) = 11,8 + 1,5 M_s \text{ (Gutenberg-Richter, 1956) (3)}$$

où M_s est la magnitude de surface.

Cette relation n'est pas utilisable telle quelle pour de faibles séismes enregistrés à distance proche. La magnitude M_s sera assimilée à la magnitude locale, ML. La magnitude ML est ici calculée à partir des amplitudes déterminées par le système automatique et peut donc différer légèrement des valeurs de magnitudes issues d'analyses plus précises.

La relation (2) conduit à des estimations des moments sismiques compris entre 10^{14} et 2.10^{19} dyne.cm (soit 10^7 et 2.10^{12} N.m). Ces valeurs sont du même ordre de grandeur, ou inférieures, à celles observées antérieurement à 1997.

Le cumul des énergies issues des relations (1) et (3) appliqué à la zone Françoise s'étage dans une fourchette comprise entre $1,63.10^{11}$ et $4.93.10^{15}$ ergs avec la relation 1, ou entre $8.96.10^{10}$ à $4.86.10^{15}$ avec la relation 3. Ces 2 formulations conduisent donc à des résultats très similaires. Les valeurs obtenues sont du même ordre de grandeur que celles observées antérieurement à 1997 (réf. 3). La relation 1 sera utilisée par la suite.

L'évolution de l'énergie libérée au cours du temps lors des relâchements de contrainte est représentée par le cumul des contributions individuelles pour chaque zone (Figure 9). La courbe résultante met en évidence une évolution par plateaux, comme cela est observé en d'autres contextes, marquée par les sauts en énergie produits par les événements de plus forte magnitude tels que ceux de 1999, 2003, 2006 et 2009 ayant donné lieu à des alertes, tandis que les événements de faible magnitude (i.e. inférieure à 1) ne libèrent que peu d'énergie.

L'essentiel de l'énergie libérée se manifeste en zone Françoise, reflet des magnitudes les plus fortes de la zone nord-est enregistrées dans cette zone. Le bilan énergétique en zone Françoise est environ 10 fois supérieur à celui des 2 autres zones Irène et Camélia depuis 1996. Ces dernières présentent des valeurs cumulées d'énergie presque identiques entre 3 à 4.10^{14} ergs.

Cependant, cette représentation de la sismicité en énergie ne révèle pas de corrélation particulière avec des épisodes de variations des déplacements en profondeur, tel que l'épisode d'accélération observé par les mesures FIL en 2004-2005 (Figure 17). Celui-ci avait coïncidé avec un accroissement du nombre d'événements, notamment en zone Irène (réf. 9). L'absence de corrélation claire des déplacements avec la courbe d'énergie cumulée peut s'expliquer par les écarts de valeurs très importantes balayées par ce paramètre, tendant à écraser les plus faibles variations. Une autre raison pouvant être invoquée est un manque de corrélation due à la profondeur des événements les plus importants, et de mouvements non perçus pas les FIL qui sont ancrés dans des couches plus superficielles (cf. Figure 13).

La courbe du nombre cumulé d'événements fournit alors une information plus fine et complémentaire sur l'évolution continue de la zone et traduit l'intérêt de détecter de très faibles événements.

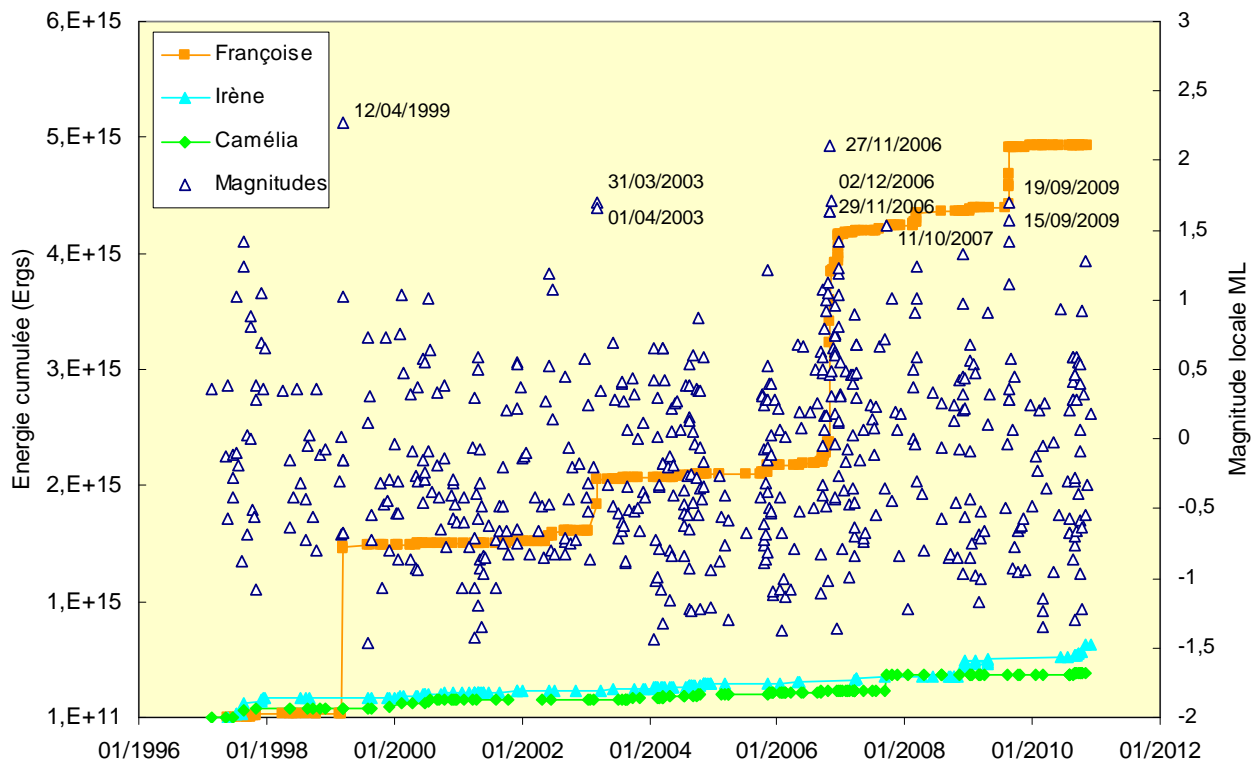


Figure 9 : Courbes cumulatives des énergies (courbes colorées, axe de gauche) et magnitudes locales ML pour tous les événements (triangles, échelle axe de droite) en zone nord-est, pour chacune des principales zones en mouvement (relation 1). Les magnitudes ML sont déduites des amplitudes automatiques de la base de données. Les événements étiquetés correspondent à ceux ayant déclenché l'alerte. Ils sont de magnitudes supérieures ou égales à 1,5 et se produisent tous en zone Française à l'exception de celui du 11/10/2007 localisé en zone Camélia.

3.1.3. Historique de la répartition spatiale des événements - Localisation

Bien que l'on ne dispose pas d'une analyse exhaustive de la sismicité avec une localisation pour chaque événement détecté depuis l'installation du système TELSITE en 1997, une partie des événements détectés a fait l'objet d'une analyse plus précise pour les années 2000, 2003, et pour la période de janvier à avril 2004. L'intégralité des événements sismiques détectés de fin 2005 à 2010, a été localisée (Figure 10).

La répartition de la sismicité en surface reste similaire à celle observée antérieurement à 1997 (réf. 3), se concentrant principalement dans les mêmes zones, Irène, Gisèle, Française. Un événement se produit en zone Hélène en 2010. De même, la répartition en profondeur des événements (Figure 11, Figure 12, Figure 13) montre, comme par le passé, qu'ils restent confinés à l'intérieur des limites hypothétiques des masses en mouvement pour les trois zones. Les deux événements de plus forte magnitude (n^{os} 1 et 3),

situés en zone Française et ayant déclenché les alertes de fin 2006, sont localisés à l'interface entre les masses carbonatées (à la base des calcaires crayeux) et le volcanisme (Figure 13). Les événements de septembre 2009 (n^{os} 6 et 7) sont plus superficiels et se produisent dans la couverture carbonatée.

Les mesures sismiques enregistrées depuis 2006 ne traduisent donc pas de modification des enveloppes de surfaces ou des volumes potentiels de glissement par rapport aux années antérieures (la valeur pour le scénario maximal en zone Camélia est de 670 Mm³; le volume en jeu dans le cas de l'événement Tydée, en 1979, était de 110 Mm³).

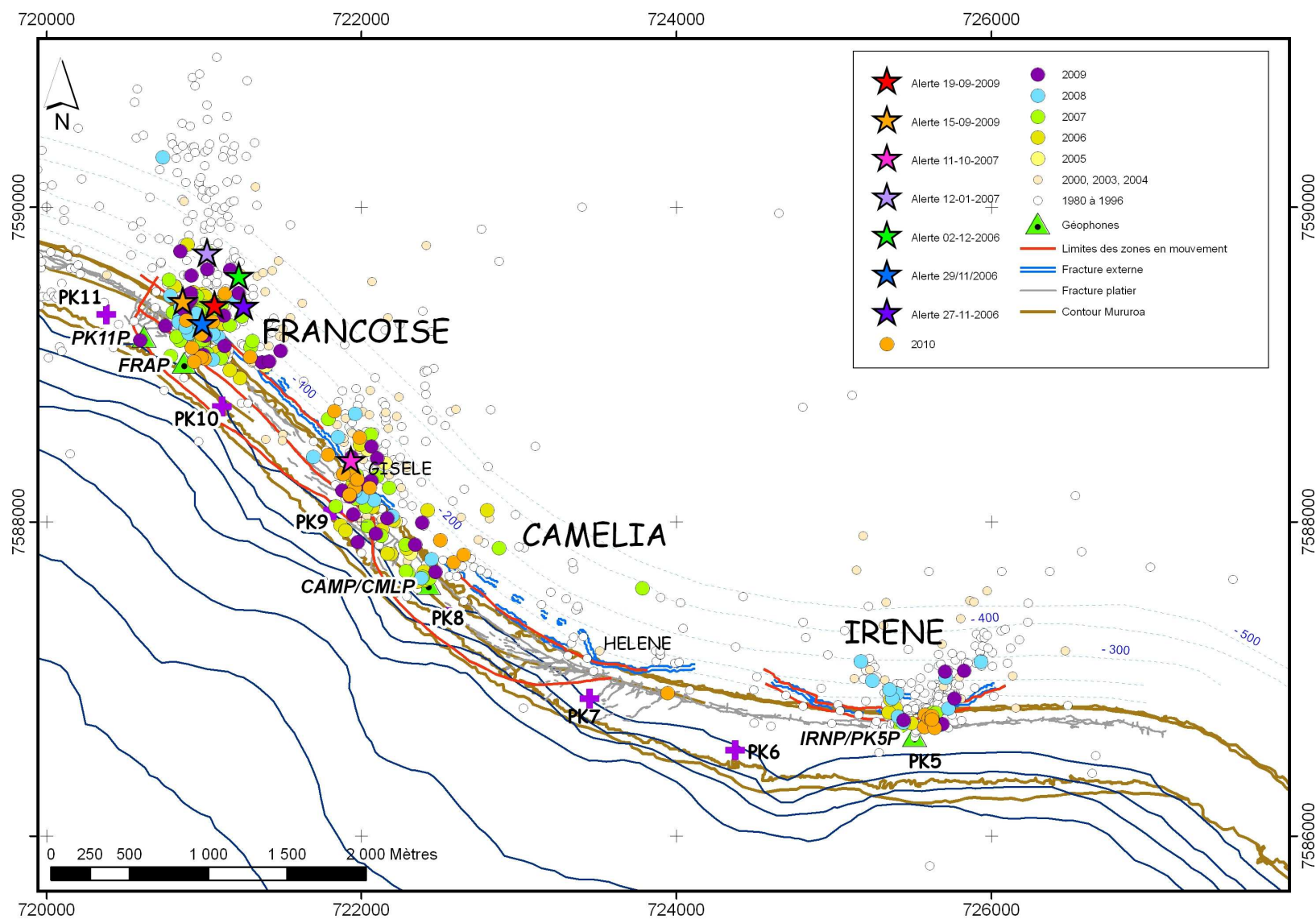


Figure 10 : Historique de la répartition spatiale de la microsismicité en zone nord-est (cercles colorés par périodes et par année à partir de 2005).
Les étoiles représentent les événements ayant déclenché une alerte sismique.

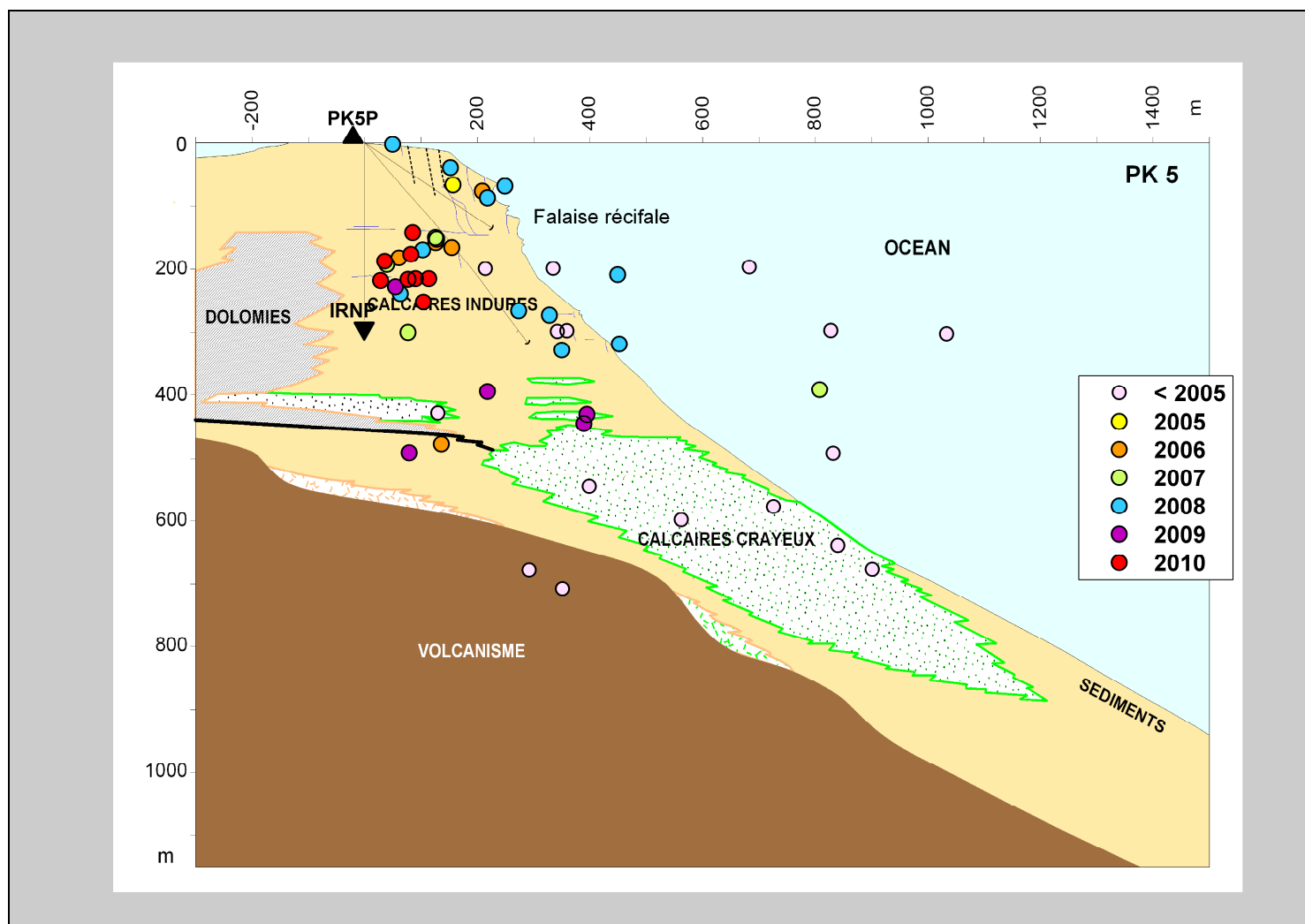


Figure 11 : Projection en coupe, dans la direction Nord, de la position des événements sismiques localisés dans le secteur Irène de 2000 à décembre 2010 (cercles colorés par année), compris dans une bande large de 750 m de part et d'autre du profil qui recoupe la station sismique IRNP en profondeur (triangle noir). Le triangle noir en surface représente la position de la station géophone complémentaire (PK5P). Les traits gris obliques représentent la position des FIL.

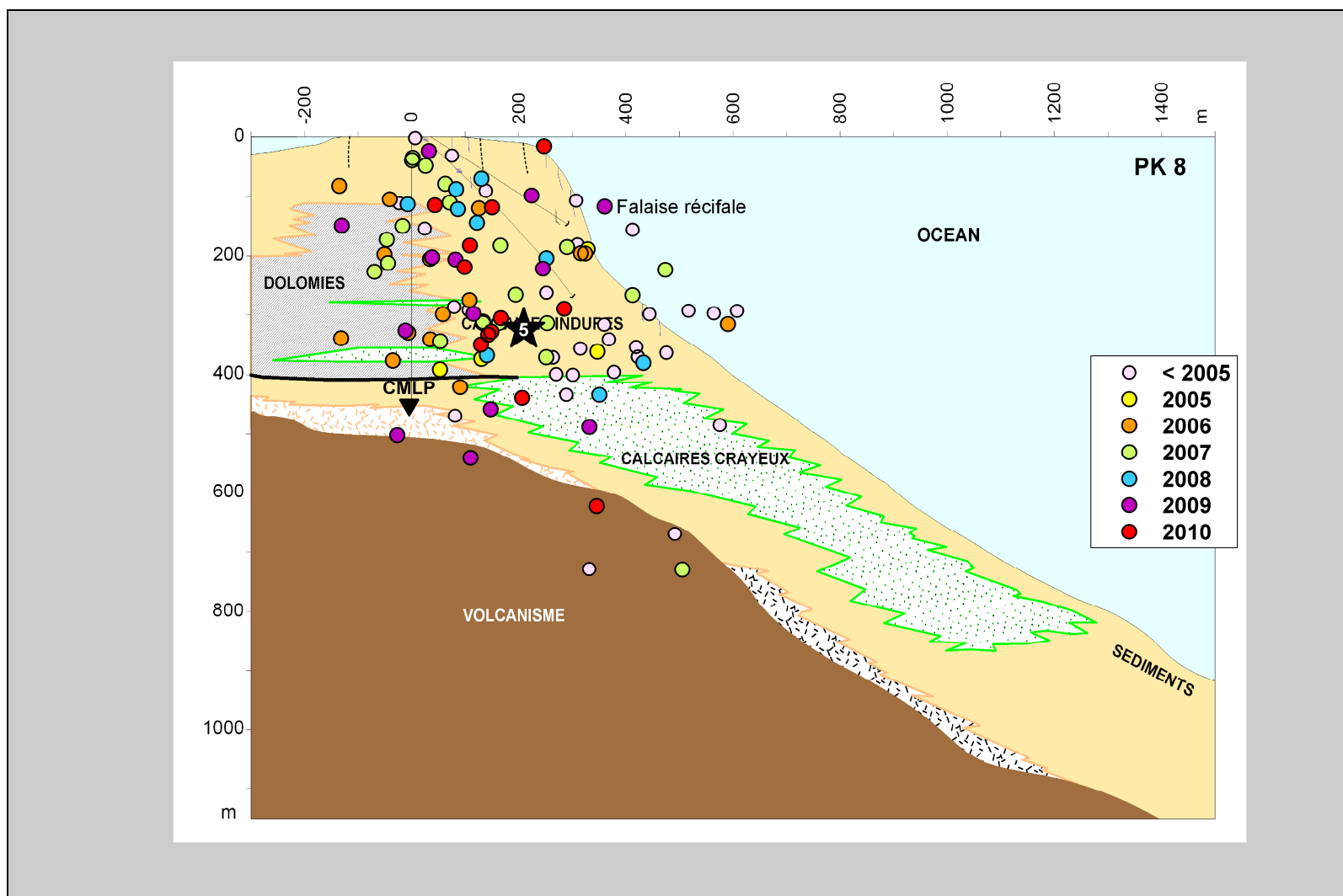


Figure 12 : Projection en coupe, dans la direction N45°, de la position des événements sismiques localisés dans le secteur Camélia, de 2000 à décembre 2010 (cercles colorés par année), compris dans une bande large de 750 m de part et d'autre du profil qui recoupe la station sismique CMLP en profondeur (triangle noir), L'étoile correspond à l'événement du 11/10/2007 ayant déclenché une alerte dans cette zone. Les traits gris obliques représentent la position des FIL.

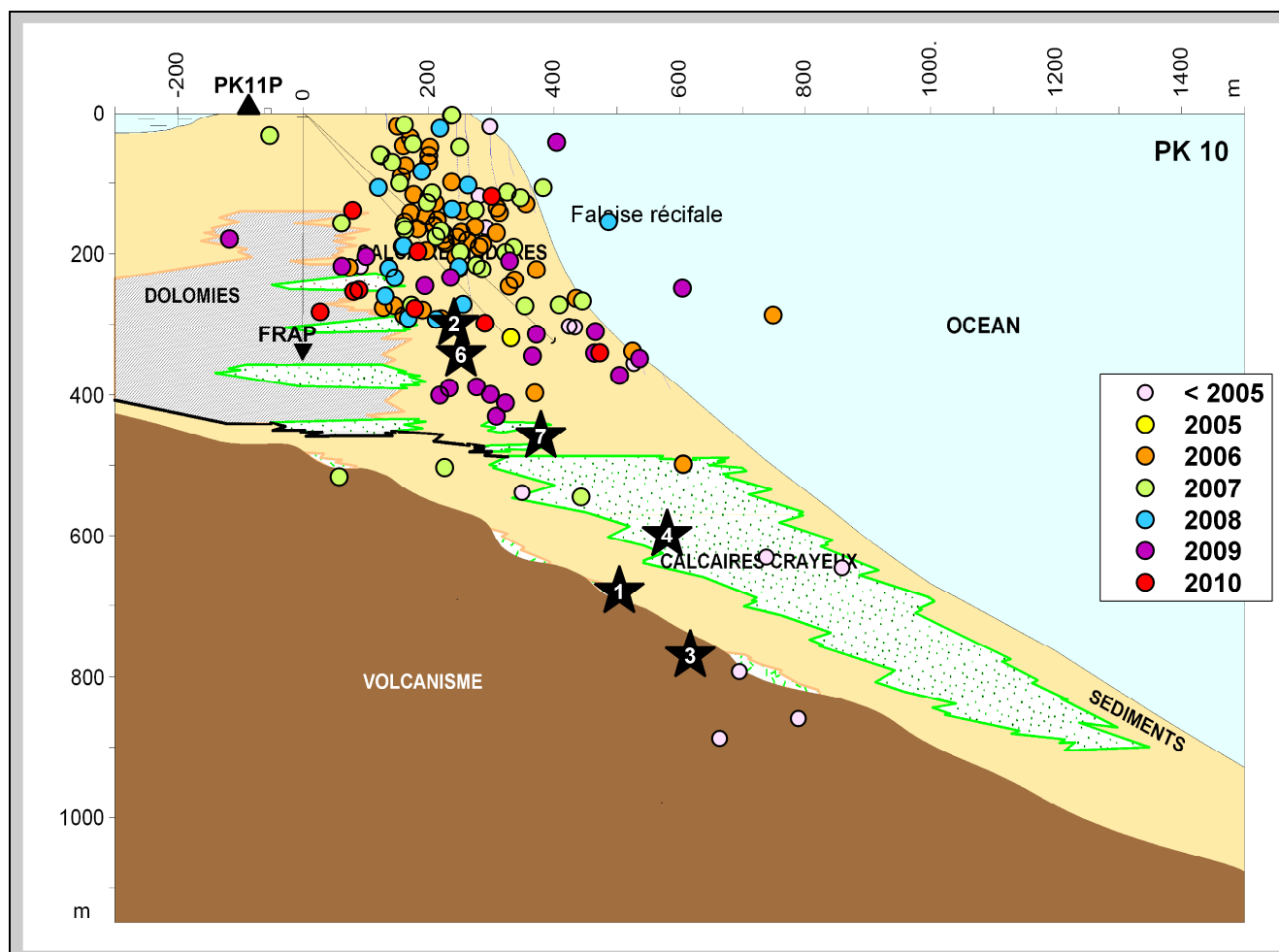


Figure 13 : Projection en coupe, dans la direction N45°, de la position des événements sismiques localisés dans le secteur Françoise, de 2000 à décembre 2010 (cercles colorés par année), compris dans une bande large de 750 m de part et d'autre du profil qui recoupe la station en profondeur FRAP (triangle noir). Le triangle noir en surface représente la position de la station géophone complémentaire (PK11P). Les étoiles correspondent aux événements ayant déclenché les alertes de fin 2006 et 2009 (1 : 27/11/2006 ; 2 : 29/11/2006 ; 3 : 2/12/2006 ; 4 : 12/01/2007 ; 6 : 15/09/2009 ; 7 : 19/09/2009). Les traits gris obliques représentent la position des FIL.

3.1.4. Mécanismes possibles des événements en zone Française

La zone Française présente dans sa partie ouest un réseau de fractures transverses visibles sur le platier, observées dès 1984, et qui définissent les limites hypothétiques de la zone en mouvement (Figure 3, Figure 10). Les événements sismiques observés dans cette zone confirment les caractéristiques cassantes de la bordure (de même pour les événements situés à la limite des zones Camélia et Française). Cependant les données sismiques sont insuffisantes pour en extraire des informations sur les mécanismes précis à l'origine des événements (dits « mécanismes au foyer »), concernant le mode de rupture (glissement ou ouverture), le type de faille, son orientation, son pendage et la direction de glissement des blocs. Quatre scénarios, sans être exhaustifs, peuvent cependant être envisagés (réf. 25) :

- 1) Événements se produisant sur une surface de découplage (hypothétique), constituant la limite ouest de la zone « Française », où s'accumulent les contraintes avec le bloc adjacent. Les événements correspondraient au glissement d'un compartiment de la zone « Française » vers le nord, sous l'effet de la gravité, par rapport au reste de la couronne corallienne qui reste stable. Ils se produiraient sur une faille, plan ou surface concave, de direction générale perpendiculaire à la ligne de côte (plan de faille d'azimut N-S), de pendage sub-vertical.
- 2) Mouvement se produisant sur un plan de faille de pendage sub-vertical, d'azimut correspondant aux failles bordières longitudinales, de type faille normale, ou dans leur prolongement en profondeur, rejoignant l'interface calcaire.
- 3) Compte-tenu des profondeurs déterminées pour ces événements, situant les foyers à l'interface entre les formations carbonatées et le volcanisme (Figure 13), les événements des 27/11 et 2/12/2006 pourraient correspondre au glissement, sur l'interface calcaire-volcanisme, d'une partie des masses carbonatées des flancs de l'atoll, vers l'océan. Compte-tenu des profondeurs, c'est ce mécanisme qui serait privilégié pour les événements ayant déclenché les alertes de 2006.
- 4) Réajustements sur des failles conjuguées, avec mode en ouverture possible (mode I) des failles bordières longitudinales externes (Figure 10). Ces mécanismes pourraient concerner les événements plus superficiels, qui constituent la majeure partie de l'activité microsismique, ils restent externes au platier. Concernant les événements les plus importants, compte-tenu de leur profondeur, il semble plus vraisemblable qu'ils soient le résultat d'un glissement de blocs sur un plan de faille (mode II) et qui ne s'écartent pas l'un de l'autre comme cela peut être le cas en surface.

3.1.5. Paramètres à la source :

Pour déduire les dimensions caractéristiques des sources des événements sismiques, dans l'hypothèse où les mécanismes correspondent à des dislocations pures, les modèles de Brune (1970) ou de Madariaga (1976) sont généralement utilisés. Ces relations reposent sur des modèles de sources sismiques circulaires. Le contenu fréquentiel des signaux émis par la source sismique contient un nombre d'informations relatives à ses caractéristiques et permet de remonter au rayon de source (r_0) au travers de l'analyse spectrale. Notamment, dans la partie intermédiaire du spectre, une fréquence dite fréquence coin, f_c , est un paramètre inversement proportionnel au rayon. En utilisant le modèle de Madariaga (1976), le rayon de source r_0 et f_c , déduite du spectre (ici des ondes P), sont reliés par :

$$r_0 = 0.32 \beta / f_c \quad (4)$$

où β est la vitesse des ondes S dans le milieu. Les résultats peuvent cependant varier sensiblement d'un modèle à l'autre.

La fréquence-coin est normalement déterminée à partir du spectre de déplacement des signaux sismiques. Bien qu'une telle analyse n'ait pas été réalisée dans le cadre présent, on peut essayer d'exploiter des éléments tirés d'études antérieures à 1995 utilisant cette méthode. Pour des événements dont les moments sismiques étaient compris entre 10^{16} dyne.cm et $8 \cdot 10^{18}$ dyne.cm, la relation (4) conduisait à des valeurs de rayons entre 20 et 110 m (Rigo, 1989, communication personnelle). Ces valeurs étaient donc compatibles avec celles trouvées dans la littérature pour des événements appartenant à la gamme microsismique (Archuleta et al., 1982, Feignier et al., 1991). Bien que les résultats soient très dépendants des modèles de vitesse et de l'atténuation, incertitudes qui s'ajoutent à celles de la localisation et de la détermination de la magnitude, la bonne compatibilité de ces précédents résultats avec ceux de la littérature permettent de suggérer des estimations des rayons de source à partir des moments sismiques déduits de (2) pour les données actuelles.

Ainsi, une estimation grossière des r_0 est proposée à partir des relations entre moments sismiques et rayons de sources obtenues à différentes échelles par Archuleta et al., (1982), (Figure 14) ou Feignier et al., (1991), (Figure 15). Les valeurs estimées les plus fortes de M_0 pour les événements de 2006 en zone Française sont inférieures à $3 \cdot 10^{19}$ dyne.cm. A partir des Figure 14 et Figure 15, en prenant en abscisse les valeurs maximales correspondant à cette valeur de M_0 , compte tenu de la dispersion, les valeurs maximales des rayons de sources estimés des événements les plus forts pour Mururoa restent inférieurs à 200 m. Ces dimensions restent largement inférieures aux dimensions des enveloppes maximales considérées pour les zones potentielles de glissement (cf. Figure 10).

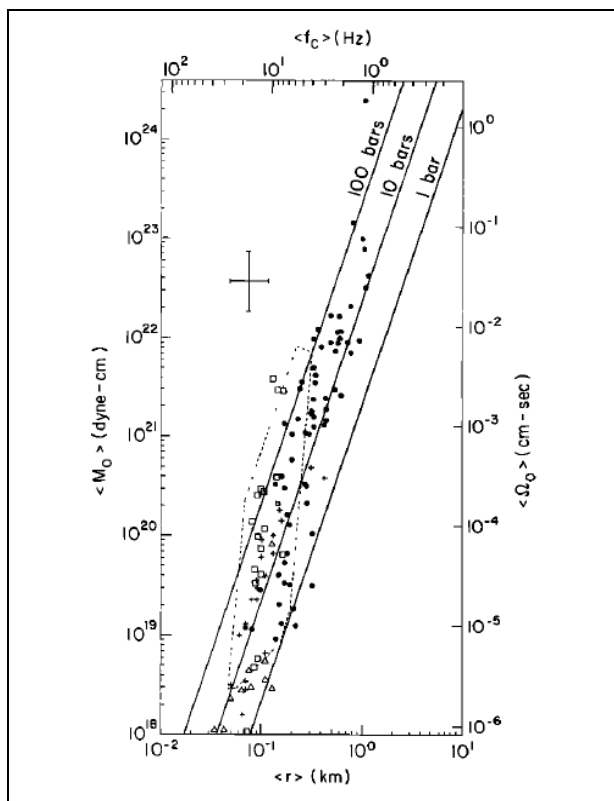


Figure 14 : Diagramme du moment sismique (en dyne.cm) en fonction du rayon de source (en km) pour les séismes de Mammoth lakes (California) (cercles pleins). Les autres symboles représentent d'autres sites d'études (Archulera et al., 1982).

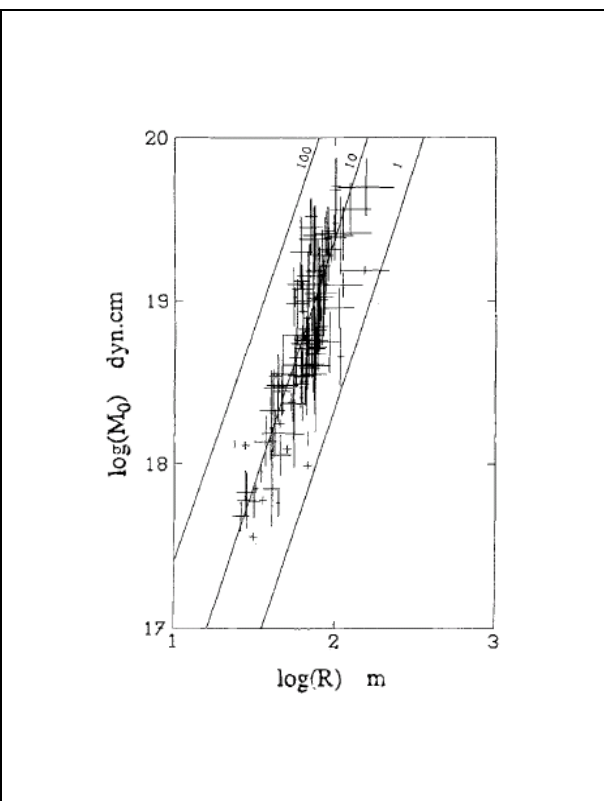


Figure 15 : Diagramme des moments sismiques (M_0) en fonction des rayons de source dans le cas du site de Lacq (Feignier et Grasso, 1991).

En conclusion, l'activité microsismique en 2010 en zone nord-est de Mururoa reste à un niveau constant. C'est toujours en zone Française qu'est détecté le plus grand nombre d'événements. La répartition de la sismicité reste similaire à celle observée antérieurement au système TELSITE et ne traduit pas d'évolution particulière de la géométrie de ces zones depuis la fin des essais.

3.1.6. Déplacements et déformations en surface

Le déplacement horizontal mesuré en surface par GPS au centre de la zone en mouvement s'effectue durant l'année 2010 à une vitesse moyenne inférieure à 0,6 mm/mois (Figure 16). Le mouvement continue de s'effectuer dans une direction globalement nord/nord-ouest. Des anomalies sont relevées au mois de septembre 2009 avec de brusques sauts observés simultanément sur les composantes est (-2,7 cm) et verticale (-1,5 cm). Une inspection effectuée en décembre 2010 a révélé un phénomène d'affouillement à la base de la digue, plus important au niveau du bloc supportant le pilier GPS. Celui-ci ne serait plus correctement couplé au mouvement du platier, mais continuerait cependant de transmettre une part des mouvements.

Malgré ces anomalies, les mouvements pour les composantes est et verticale semblent stabilisés depuis mai 2010, et restent faibles.

Bien que l'évolution de la valeur moyenne dans les trois directions soit moins régulière depuis 2003, le mouvement mesuré par ce capteur GPS confirme le ralentissement d'environ 50% en ce point de la digue Charlie entre la période 2001-2007 et 1996-2001 pour la composante nord. Ceci est notable étant donné que cette zone est affectée par les mouvements en surface les plus importants de la zone nord.

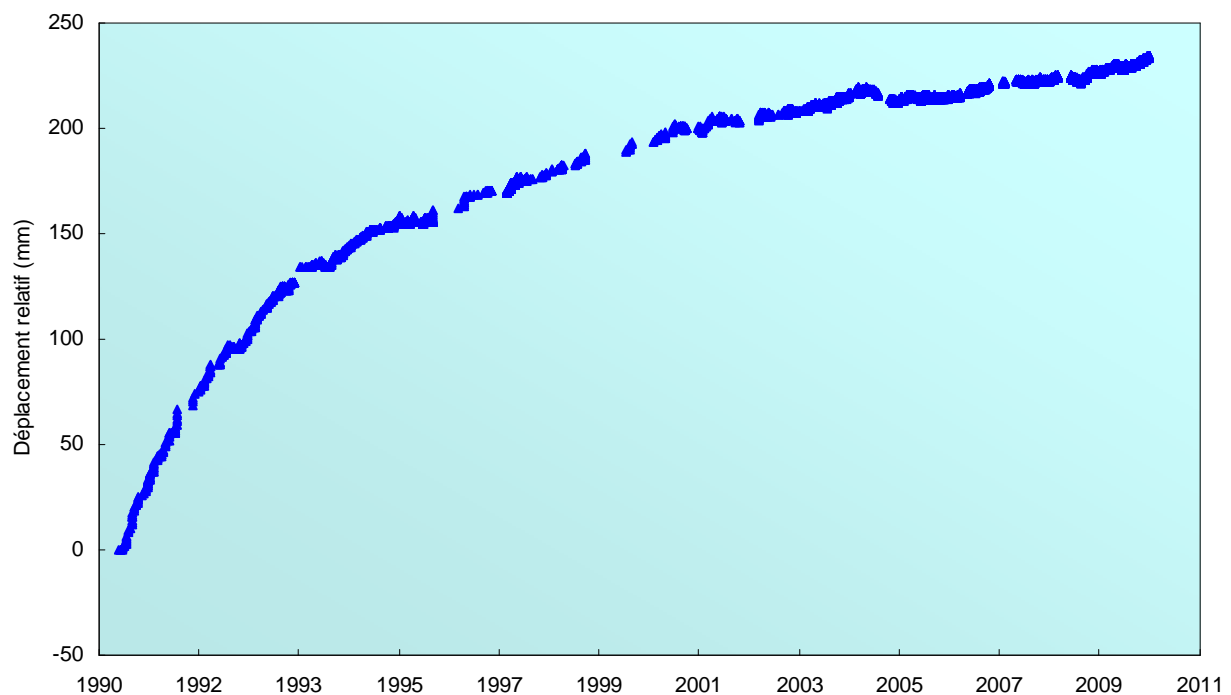


Figure 16: Evolution du déplacement relatif à la station Jeanne dans la direction nord, mesuré par la station GPS1 implantée en surface et en bout de digue au centre de la zone Camélia, de juin 1990 à fin 2010.

Les vitesses issues des données des deux points GPS ALPHA et ECHO installés en octobre 2005 (Figure 3) en bordures ouest et est de la zone Camélia ne montrent pas d'évolution notable en 2010. Elles confirment la stabilité du platier au niveau des limites est et ouest de la zone Camélia, au regard des parties

plus externes de la couronne. Elles sont compatibles avec les mesures de la campagne topographique de 2007 (Figure 23).

Les mesures GPS provenant des stations situées sur les digues HOTEL, dans la zone Irène, et KILO, dans la zone Française, indiquent des déplacements qui restent également minimes. Leur mouvement est compatible avec les faibles déplacements déduits des mesures des campagnes 2001 et 2007 des piliers jalons respectivement situés à proximité, HOTEL et KILO (réf. 6) et attestent de la stabilité du platier. Cela confirme, avec les données sismiques, l'absence de modification de l'emprise des limites de glissement, tant en surface qu'en profondeur. La présence des stations de surface suivies en continu est donc indispensable pour vérifier que l'emprise du glissement reste confinée aux parties externes de l'atoll, dans les zones Française et Irène (cf. §3.4 Interprétation, Figure 24).

L'absence de mouvement décelé en surface par les mesures des stations GPS et des piliers jalons au niveau des zones Française et Irène confirme que l'emprise, en surface, de la limite hypothétique des zones de glissement, dans ces deux zones, reste confinée à la partie externe de la couronne.

3.1.7. Déplacements et déformations en profondeur

Sensibilité des extensomètres

Le dispositif équipant les FIL (Forages Inclinés Latéraux) est le suivant : un câble ou un train de tiges passe dans un forage incliné, tubé de plusieurs centaines de mètres de longueur, dont l'extrémité inférieure a été laissée libre de façon à permettre l'ancrage du câble (ou du train de tiges) au terrain. En surface, un capteur monté sur un dispositif fixe mesure le déplacement de l'extrémité supérieure du câble provoqué par le déplacement de l'ancrage par rapport au dispositif fixe.

La mesure de déplacement est effectuée par un capteur de type extensomètre contenant une bobine reliée à une bague de couplage solidaire d'un câble en INVAR (relié au câble ou au train de tiges qui coulisse dans le forage) dont on veut mesurer le déplacement, la bague se déplaçant avec celui-ci. D'après les mesures d'étalonnage, l'étendue de mesure du capteur extensomètre est de ± 200 mm avec une résolution de 10 μm dans la partie linéaire et une précision de 50 μm . (réf. 7).

Cependant, compte tenu de la nature du dispositif ancrage-câble-capteur de déplacement, la fonction de transfert déplacement de l'ancrage-déplacement mesuré en surface est complexe et dégrade cette résolution. En particulier, les câbles ou tiges reposent sur la génératrice inférieure du tubage et le frottement associé peut provoquer un phénomène de « stick-slip » (ou blocage-glissement). Ce phénomène peut rendre l'interprétation des mesures en surface délicate quand les déformations sont très lentes (réf. 1). La question se pose surtout pour les FIL de la zone PK8 qui évoluent très peu. En revanche, pour les zones PK10 et PK5, les mouvements des FIL semblent évoluer avec des alternances régulières d'épisodes de

blochage-déblochage, à attribuer aux effets combinés du mouvement du massif rocheux et des frottements du câble dans le tube.

On a par ailleurs constaté que les mesures obtenues avec ces dispositifs sont cohérentes avec les autres capteurs (réponses similaires à celles des inclinomètres et mesures géodésiques) lors des sollicitations (réf. 3, pp. 575 à 578)].

La fonction de transfert est donc complexe et elle dépend à la fois de la longueur du câble et de la cinétique de la déformation. On peut cependant estimer la résolution du dispositif à quelques millimètres, c'est-à-dire suffisante pour détecter les changements de tendance significatifs.

Mesures dans les forages inclinés latéraux

Les valeurs des vitesses déduites des mesures de déplacement des câbles (dont les profondeurs d'ancrage sont comprises entre 129 m et 319 m), ne présentent pas d'évolution notable en 2010. Elles restent en moyenne inférieures à 0,5 mm/mois pour l'ensemble des mesures issues des FIL (Figure 17). Elles étaient de l'ordre de 2 mm/mois en 1996.

En zone Française, les mesures issues du câble à 45° implanté dans le forage incliné au PK10, ne sont plus utilisables depuis fin 2004 (réfs. 9, 11, Figure 17). Les dernières données mesurables indiquaient une vitesse de 2 mm/mois.

Les mesures des capteurs de la zone Camélia (FIL 8.30 et 8.40) indiquent des vitesses très faibles (< 0.2 mm/mois). Ces vitesses, apparemment plus faibles que les mesures dans les autres zones, pourraient cependant être sujettes à caution. Elles pourraient s'expliquer par le fait que toute cette partie du platier serait en mouvement, embarquant avec elle toute l'instrumentation des FIL 8.30 et 8.40 dans un mouvement de « corps rigide ». Elles représentent alors des mesures différentielles du déplacement des câbles entre les têtes de puits et leur ancrage.

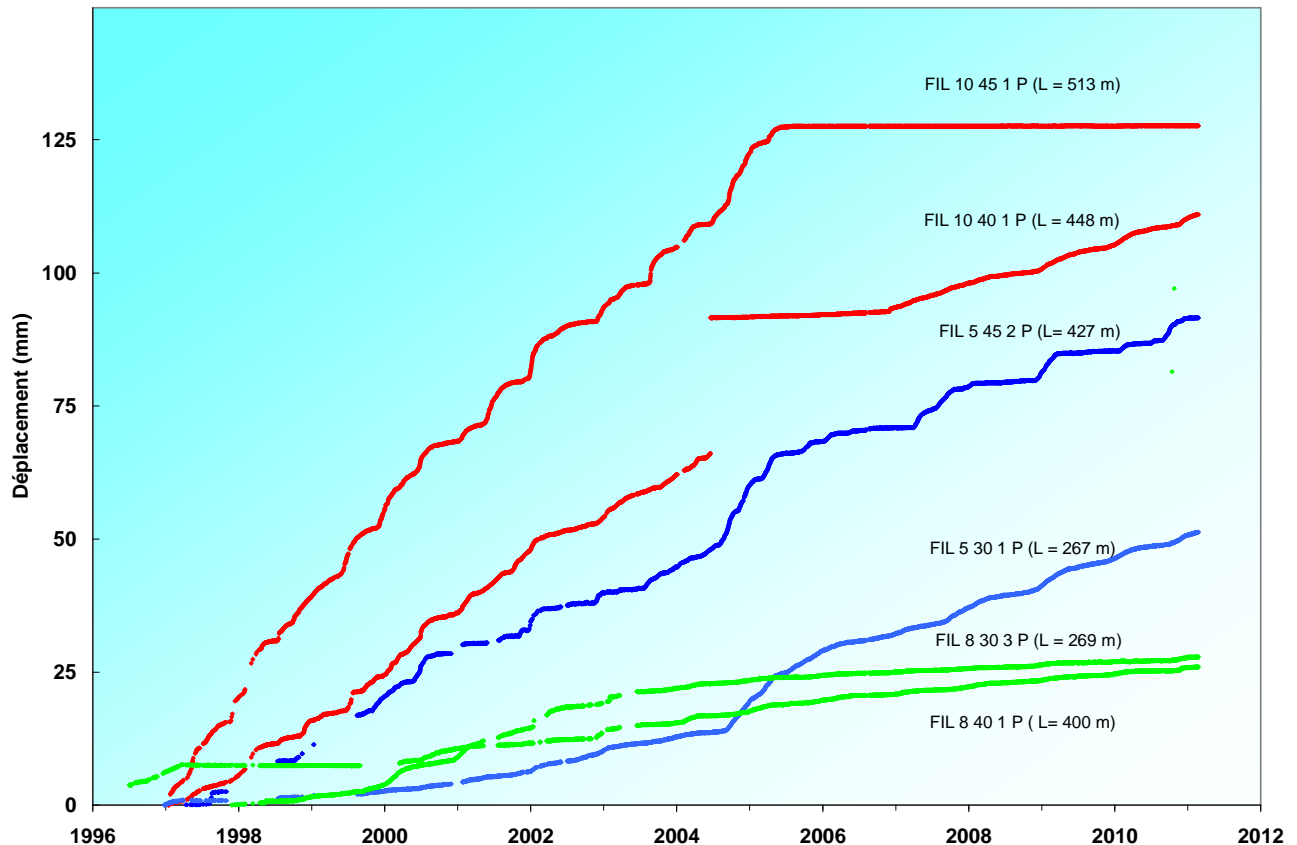


Figure 17 : Déplacements mesurés de 1997 à janvier 2011 par les câbles implantés dans les forages inclinés dans les zones Française, proche du PK10 (courbes rouges FIL à 45° et 40°), Irène, proche du PK5 (courbes bleues : FIL à 45° à 30°) et Camélia, proche du PK8 (courbes vertes : FIL à 40° et 30°).

Mesures inclinométriques

La déformation au sein des couches profondes mesurée par des inclinomètres scellés dans un puits au sein des couches de calcaires crayeux et de la zone de transition, entre 350 et 450 mètres de profondeur² au centre de la zone Camélia ne présente pas d'évolution notable en 2010. C'est dans cette zone que les capteurs, répartis avant 1996, sur toute la hauteur du puits, avaient montré des valeurs d'évolution maximales. Les vitesses moyennes, issues des mesures des 2 capteurs les plus profonds, le n°26, implanté à la base des calcaires crayeux à 376 m (Figure 19), et le n°22, implanté dans une unité conglomeratique sous les calcaires crayeux, à 451 m de profondeur (Figure 20), sont stables et inférieures ou égales à 0,2 mdeg/mois, dans la direction nord. Juste au-dessus de ces couches, les mesures issues du capteur n°29, implanté à 350m dans les calcaires crayeux (Figure 18), montrent une inclinaison vers l'est depuis avril 2007, avec une vitesse stable de 0,26 mdeg/mois. Cependant, le nombre de composantes valides se réduit : sur les 20 composantes que comporte la chaîne inclinométrique, seulement 7 sont encore en état de fonctionnement.

² (le substrat volcanique se trouve à 500 m de profondeur au droit de forage GEO8B).

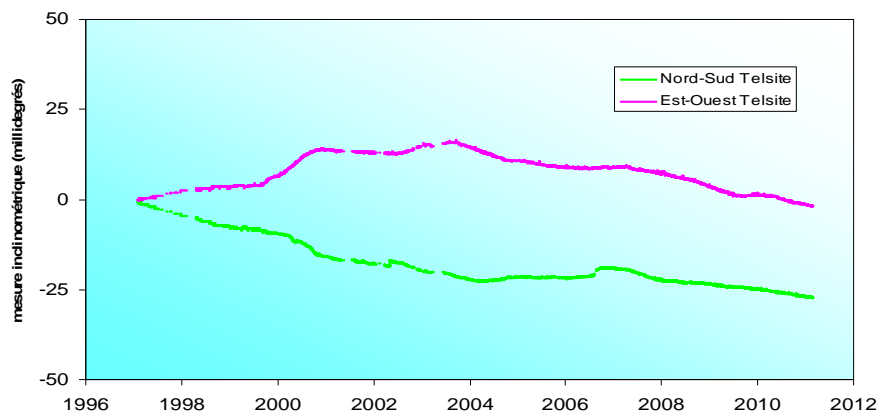


Figure 18 : Evolution du capteur inclinométrique du forage GEO8B (n°29) en zone Camélia implanté dans les dolomies à 350m de profondeur.

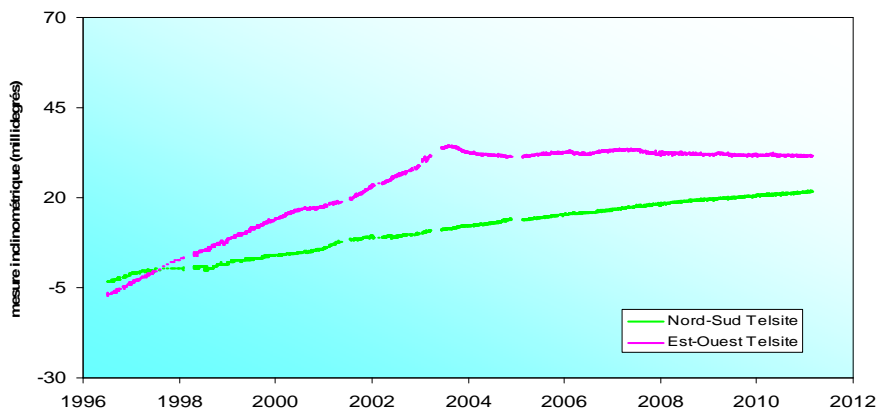


Figure 19 : Evolution du capteur inclinométrique du forage GEO8B (n°26) en zone Camélia implanté à la base des calcaires crayeux à 376 m de profondeur.

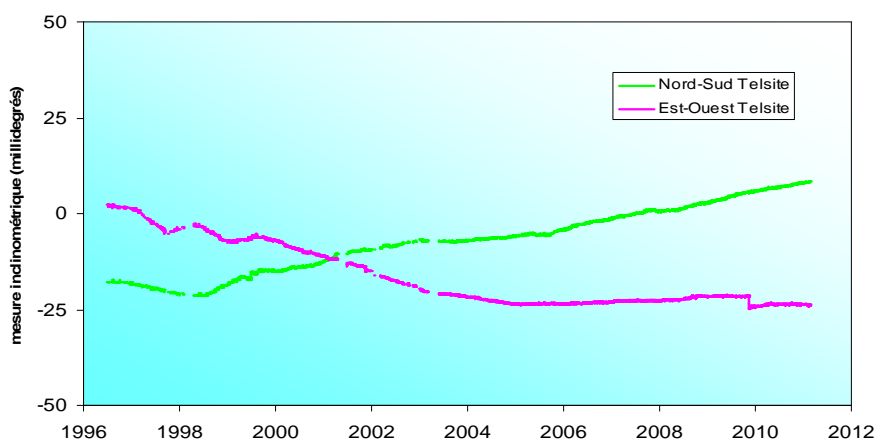


Figure 20 : Evolution du capteur inclinométrique du forage GEO8B (n°22) en zone Camélia implanté dans la partie supérieure d'une unité conglomératique sous les calcaires crayeux à 451 m de profondeur.

Synthèse de l'activité en zone nord-est

La synthèse des mesures obtenues en zone nord-est en 2010 est présentée dans le tableau 2.

Indicateur	Valeur fin 2010	Valeur observée après la période 1995-1996.	Valeur associée à un changement d'évolution significatif
Sismicité : nombre de microséismes par semaine	= 1 /semaine sur l'année	< 1 /semaine	> 10 / semaine
Déplacements horizontaux et dans les forages inclinés	≤ 1 mm / mois	< 2 mm / mois	> 20 mm / mois
Déplacements verticaux	< 1,3 mm / mois	< 1 mm / mois	> 10 mm / mois
Inclinométrie	≤ 0,3 mdeg / mois	< 0,2 mdeg / mois	Quelques millidegrés/ mois

Tableau 2 : Synthèse des mesures TELSITE obtenues en zone nord-est en 2010.

Les valeurs actuelles (2ème colonne) sont comparées avec les valeurs observées après l'arrêt définitif des essais en 1995-1996 (3^{ème} colonne), qui elles-mêmes correspondent aux valeurs qui avaient été observées dans les années précédant la reprise des essais.

Les quatre indicateurs restent associés à une évolution habituellement observée sur la période 1996-2010.

Ces mesures montrent que le mouvement reste globalement cohérent avec les prévisions d'un mouvement progressivement plus lent depuis la fin des essais, mais que celui-ci reste néanmoins mesurable.

L'activité géomécanique actuelle de la zone nord-est peut être classée au niveau zéro de l'échelle des risques (réf. 1) correspondant à la situation habituelle.

3.2. Bilan de l'évolution des autres zones de Mururoa issu des données TELSITE

Comme pour les années précédentes, une légère activité sismique est détectée en 2010 dans le secteur sud-est (zone Simone) de l'atoll. Il n'est pas détecté d'activité dans les autres secteurs que surveille l'ensemble du système TELSITE.

En 2010, 5 événements sismiques très faibles (magnitudes $ML < 1$), sont enregistrés en zone Simone, par la station SIMP (Simone 8), soit un nombre équivalent à celui de 2004 dont un seul a pu être localisé, les autres étant d'amplitudes trop faibles (Figure 6). Les foyers se répartissent en trois essaims au sud, au sud-est et à l'est de la station SIMP (Figure 21). La Figure 22 montre un exemple représentatif de signaux de relâchements de contrainte enregistrés par cette station. Après une forte augmentation de l'activité sismique observée en 2006 (avec 34 événements), le nombre de microséismes continue de décroître progressivement en nombre et magnitude vers un niveau proche de celui des années antérieures (nombre d'événements < 10).

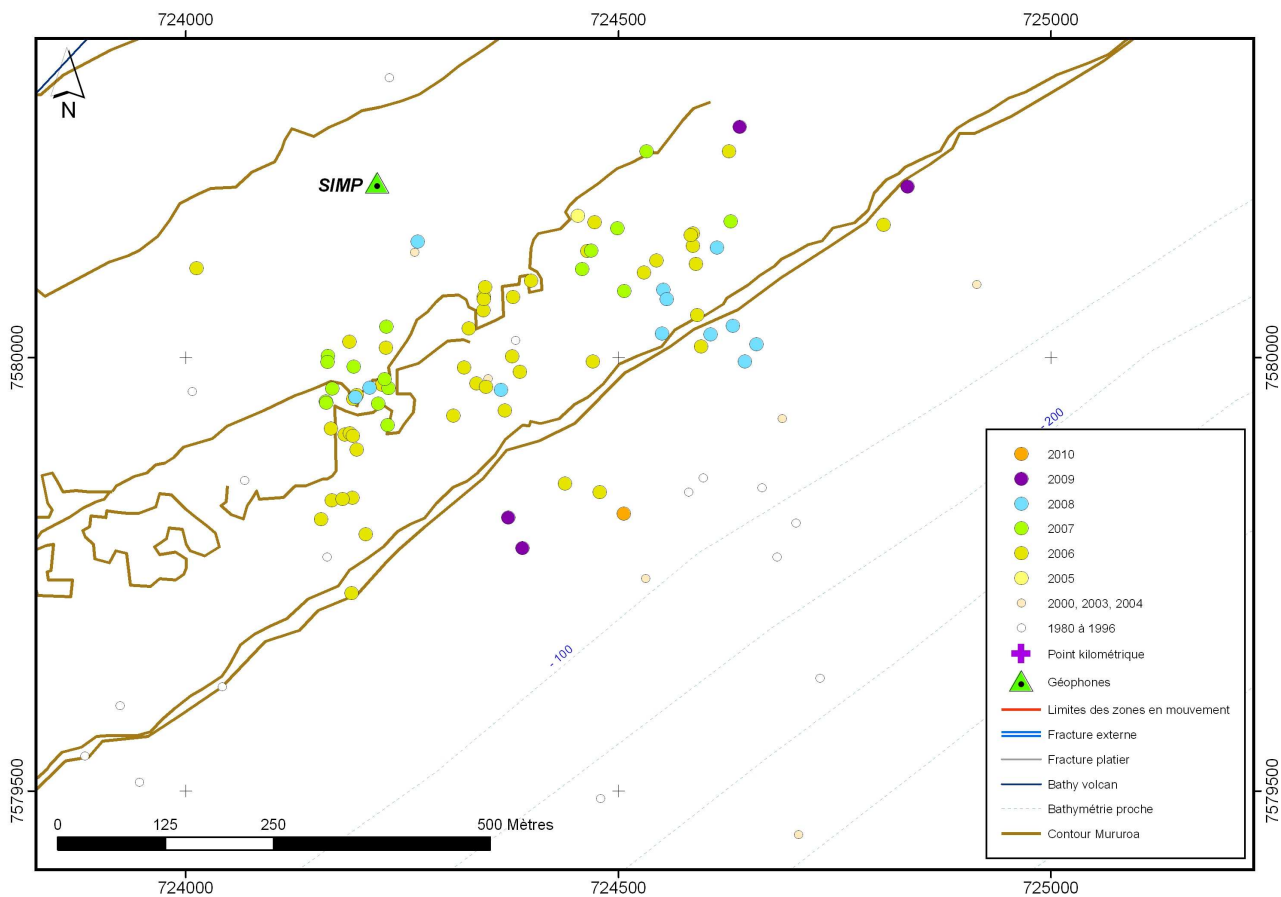


Figure 21 : Carte des événements microsismiques localisés de 1990 à 2010 en zone Simone (localisation exhaustive sur la période 12/2005–11/2008).

L'interprétation qui peut être donnée de cette activité est que la zone sud-est a été sollicitée par des expérimentations et présente des caractéristiques morphologiques similaires à la zone nord. La sismicité observée par le passé était principalement consécutive aux expérimentations. Cette zone présente une sismicité résiduelle qui reste très faible en nombre et amplitude et conforme aux prévisions (réf. 3, p. 527).

Aucun événement sismique n'a été détecté en zone sud-ouest de l'atoll.

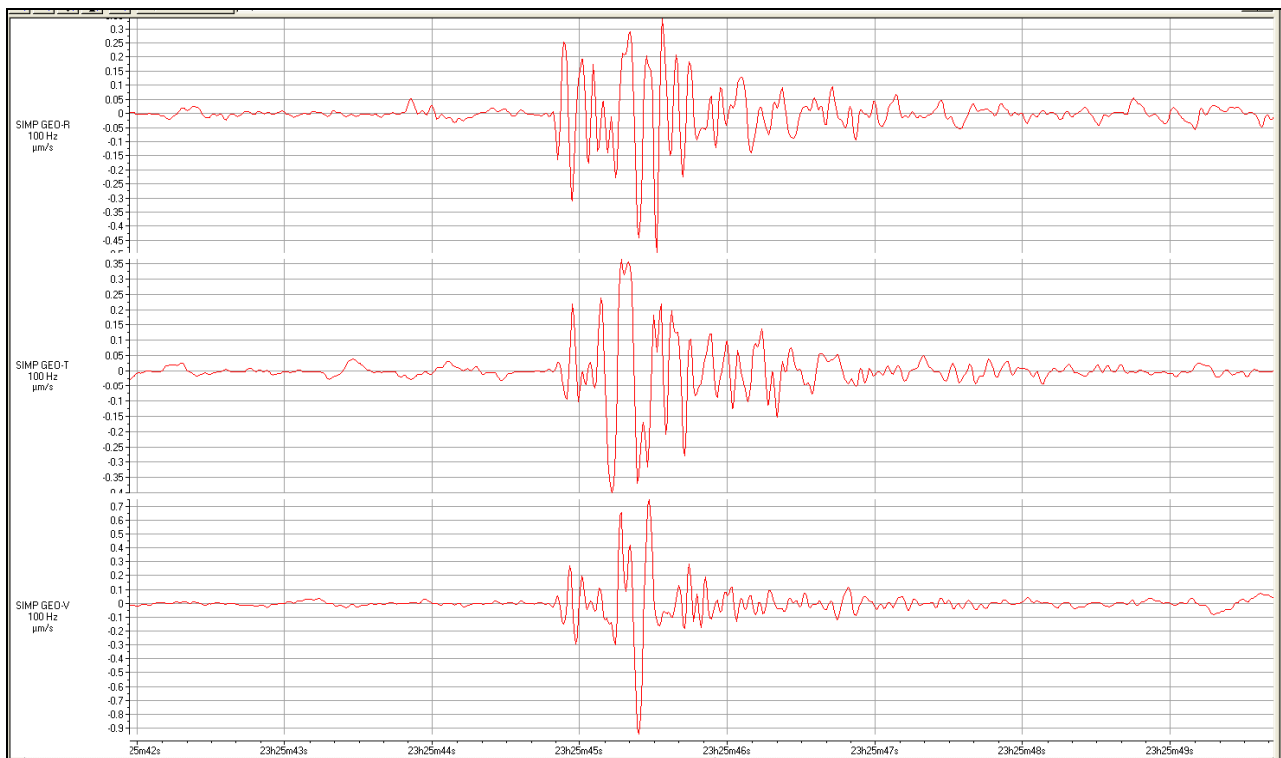


Figure 22 : Exemples de signaux de relâchements de contrainte observés par la station Simone située en zone sud-est de Mururoa, le 12 juin 2010.

3.3. Synthèse des résultats de la campagne topographique quinquennale 2007

3.3.1. Rappel du contexte

Dans le cadre des campagnes de relevés spécifiques à une échelle plus globale que celle fournie par le réseau TELSITE, une campagne topographique a été réalisée à Mururoa et Fangataufa fin 2007, du 15 octobre au 1^{er} décembre. La précédente avait eu lieu en 2001. Les résultats ont fait l'objet d'un rapport par la société SETIS en mars 2008 (réf. 15) et d'une analyse par le CEA en septembre 2008 (réfs15, 16). Les principales conclusions de l'évolution entre les deux périodes, 1996-2001 et 2001-2007, sont rappelées ci-dessous :

3.3.2. Mesures topographiques en zone nord de Mururoa.

- Les mesures en surface indiquent que les mouvements **horizontaux et verticaux** se manifestent, comme par le passé, principalement dans la partie centrale de la zone Camélia (Figure 23). Ils sont minimes de part et d'autres de cette zone et confirment l'absence de modification des enveloppes de glissement.
- Les mesures de vitesses de déplacement **horizontales sont stationnaires sur la partie émergée** dans la zone comprise entre PK6 et PK8 (les valeurs maximales sont observées pour les Piliers TOPO13, TOPO14 et TOPO25 (5.2 mm/an) en zone centrale Camélia.
- Les mesures de vitesses de déplacement **horizontales pour la partie centrale externe** de l'atoll montrent un ralentissement de 30%. Ces vitesses restent cependant plus élevées en absolu que celles mesurées sur le platier (vitesse maximale ≤ 7 mm/an en extrémité de la digue Charlie-Delta).
- Un ralentissement des mesures de vitesses de déplacements **verticaux** sur la route et les digues de l'ordre de 50% à l'exception de 3 points situés à l'extrémité de la digue Charlie-Delta (vitesse maximum ≤ 1 cm/an).
- Les données GPS de la campagne, les données permanentes GPS issues du système TELSITE et les données effectuées par mesures de topographie classique sont cohérentes.

Excepté en quelques points localisés où le mouvement est stationnaire, ces tendances confortent donc les prévisions sur l'évolution vers un ralentissement progressif global du mouvement en surface de la zone nord au centre de la zone Camélia.

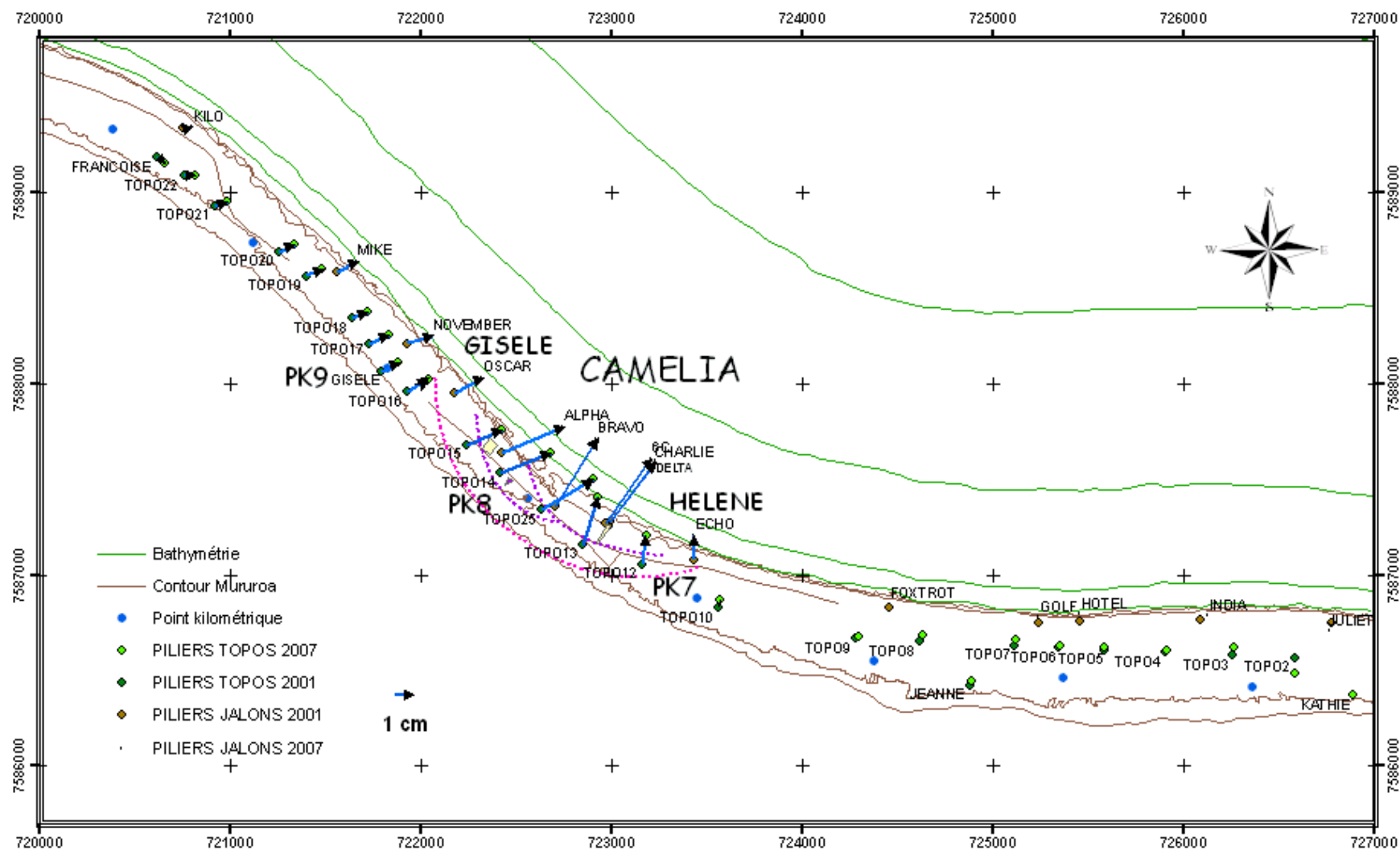


Figure 23 : Vecteurs déplacements planimétriques des piliers topographiques et des piliers jalons 2001-2007 (flèches bleues) après recalage de la polygonale principale. Les courbes en pointillés roses et violets indiquent les limites de découpage de zones en mouvement (réf.10).

3.3.3. Mesures topographiques en zone sud-est de Mururoa

Les mesures de **planimétrie** effectuées par topographie classique à partir de 2 piliers topographiques situés en zone BLEUET (TOPO43) et SIMONE (TOPO69) et les piliers jalons correspondants ne font pas apparaître d'évolution notable depuis les dernières mesures de 1987. Les points SIMONE et VIVIANE ont été relevés par GPS. Ils ne montrent pas d'évolution particulière.

Les mesures de **nivellement** effectuées sur la route donnent un écart de déplacement vertical maximal de 0,9 cm sur 6 ans (PK7.3S). Les mesures n'indiquent pas de ralentissement entre les deux périodes, mais les vitesses restent cependant très faibles ($< 1,5$ mm/an).

3.3.4. Conclusion

Les résultats issus de la campagne topographique 2007 sont en accord avec les données continues. Ils indiquent que le mouvement en zone nord Mururoa, dans son ensemble, bien que très lent et poursuivant un ralentissement progressif, reste néanmoins mesurable.

Excepté en quelques points très localisés, les résultats de la campagne topographique confortent les prévisions d'un ralentissement global progressif ou la stagnation des vitesses de déplacement en surface en zone nord. Cependant, ce ralentissement ou stagnation observé en surface ne s'accompagne pas d'un ralentissement aussi net en profondeur : l'activité sismique se maintient au niveau de la période 2002-2004, alors que les mouvements en profondeur de la partie externe des flancs subsistent.

3.4. Interprétation

Les résultats de l'évolution, déduite de l'ensemble des mesures du système continu TELSITE et de la campagne topographique 2007, sont compatibles avec l'interprétation issue de l'étude de l'évolution géomécanique de l'atoll (réf.10) qui faisait ressortir les conclusions suivantes :

- Un amortissement global du mouvement dans les trois zones de la partie nord de l'atoll est confirmé depuis la fin des essais. Du fait de la persistance d'un mouvement lent en profondeur (sous l'effet du mécanisme de fluage) et de quelques irrégularités récentes dans l'évolution, la surveillance du site nécessite le maintien en place de tous les capteurs.
- Les trois zones présentent des mouvements lents, différentiels, en profondeur (Figure 24 a, b, c). Jusqu'à fin 2004, avant le blocage des capteurs en zone PK10, les mesures indiquaient des déplacements en profondeur les plus rapides dans la zone Française.
- En surface, c'est en zone Camélia, zone très fracturée, que les mouvements sont les plus importants (Figure 24 b, Figure 23), et intéressent la partie émergée. Le mécanisme global en

profondeur interagit avec des mouvements plus superficiels de blocs rocheux susceptibles de se détacher ou de basculer de la falaise.

- En zone Irène, le mouvement intéresse une partie immergée des masses carbonatées situées au-delà de la limite marquée par les fractures externes sous-marines (Figure 24 c).
- Les mouvements résultent de phénomènes d'instabilité gravitaire, pouvant subir des accélérations transitoires sous l'effet de petites perturbations, non modélisables et non prévisibles, surimposés au mouvement lent régulier (qui peut être modélisé par des lois rhéologiques).

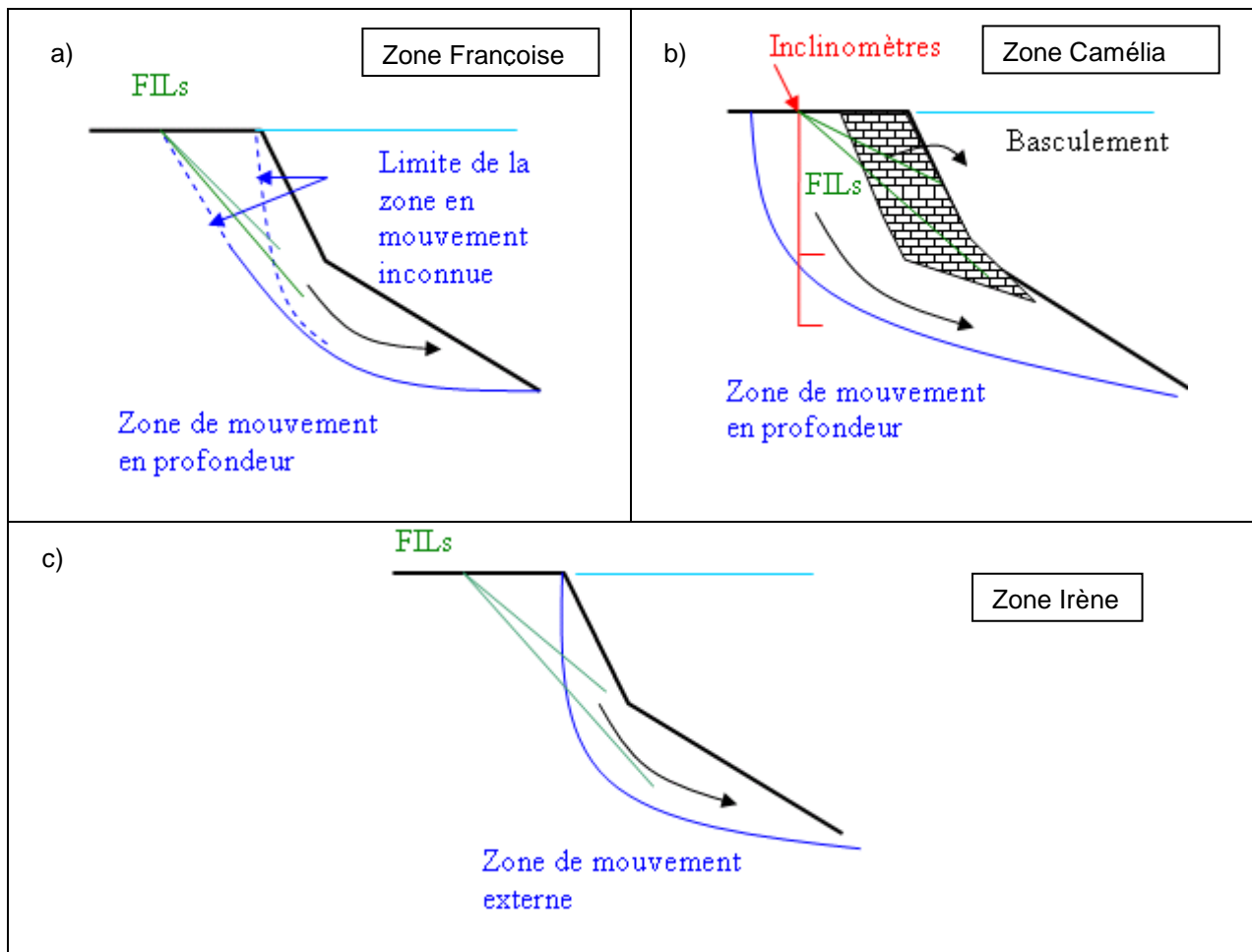


Figure 24 : Mécanisme de déformation des zones en mouvement Française (a), Camélia (b), Irène (c).

3.5. Réflexion sur le remplacement des capteurs défectueux

Les équipements en service excèdent la durée de vie prévue à leur installation (une dizaine d'année en 1997). Certains capteurs tombent progressivement en panne en raison notamment de la corrosion des câbles de transmission, notamment pour ce qui est de la chaîne inclinométrique. Grâce à la présence de capteurs de secours et aux missions de maintenance, le réseau sismique a pu être conservé à un niveau satisfaisant. Les géophones cependant se dégradent en raison de la corrosion, du grippage, de la durée de

vie électronique. Les câbles en forage inclinés (FIL) se dégradent car ils sont coincés par les mouvements de blocs différentiels dans le massif, par les frottements dans la gaine. Par ailleurs il existe une incertitude sur la tenue à long terme de l'ancrage en fond de forage.

Compte tenu des recommandations émises, de l'évolution géomécanique depuis 1996, et après recherche de solutions substitutives, le maintien d'un nombre suffisant de capteurs en profondeur est jugé indispensable pour conserver les capacités d'alerte vis-à-vis du risque immédiat et fournir des signes avant-coureurs en cas de déstabilisation de plus forte envergure. Des premières réflexions concernant le remplacement des capteurs en profondeur ont été menées (réf. 23, 25) et ont été poursuivies en 2011.

3.6. Campagne de photographie haute résolution par imagerie aérienne

Etant donné les difficultés opérationnelles rencontrées lors de deux essais d'acquisition d'images en 2004 et 2006, une étude effectuée en 2006 (réf. 12) a conduit à proposer un projet d'acquisition d'images aéroportées haute résolution, qui permettrait de surveiller l'évolution des zones inaccessibles des atolls de Mururoa ou Fangataufa, et notamment l'observation de la fracturation sous-marine (réfs. 19, 20). Faisant suite à un appel d'offre sur la base d'un cahier des charges très précis (réf. 22), une campagne a été réalisée du 14 octobre au 18 novembre 2010, à partir de drones, par la société Avion Jaune. Cette campagne a permis de réaliser un grand nombre de prises de vue photographiques des pourtours des atolls de Mururoa et de Fangataufa, avec une résolution de 20 ou 5 cm selon les zones, soit une résolution équivalente ou supérieure à celles obtenues en 1998 par hélicoptère (réf. 26). La Figure 25 montre un exemple d'image obtenue. L'exploitation des images a débuté en 2010 et les résultats seront présentés dans le bilan 2011.

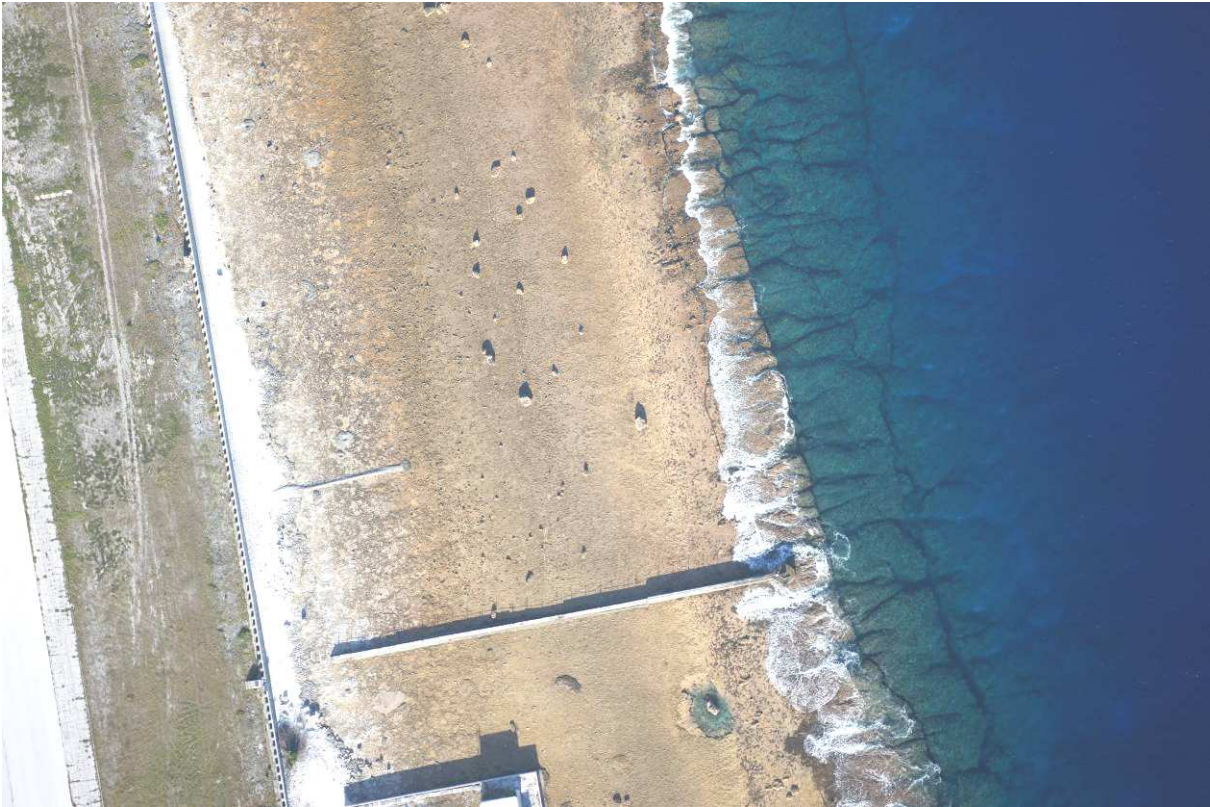


Figure 25 : Image à 5cm de résolution en zone nord (digue HOTEL) acquise par drone en 2010.

3.7. CONCLUSIONS POUR LE BILAN GEOMECANIQUE 2010

Les mesures continues issues du système TELSITE n'ont pas montré de changement de tendance notable. Elles ont confirmé un ralentissement ou des vitesses stationnaires d'évolution.

Les valeurs des vitesses déduites des mesures de déplacement des capteurs en profondeur à partir des mesures FIL sont restées les plus fortes dans les zones Irène et Française.

En surface, les données TELSITE ont indiqué que les déplacements les plus importants mesurés se trouvaient toujours en zone Camélia, en accord avec les résultats de la campagne topographique 2007.

Les mesures continues de surface dans la partie externe de la couronne corallienne en zone Camélia reposaient sur la seule station GPS (GPS1) implantée sur une digue constituée de blocs de béton en prise des flots en leur base, qui n'étaient plus correctement ancrés à la masse corallienne depuis 2009. Une consolidation de l'implantation est programmé en 2011.

L'activité sismique est restée similaire en 2010 aux années précédentes, toujours prépondérante en zone Française mais en diminution depuis 2006.

L'ensemble de ces mesures a montré que le mouvement en zone nord-est est resté faible mais toujours mesurable ou de tendance stationnaire depuis 2005.

En zone sud, les mesures de nivellement effectuées lors de la campagne topographique 2007 ont indiqué des vitesses stationnaires mais toutefois très faibles. Une activité sismique résiduelle a été détectée.

La présence d'observations dénotant la persistance, bien que faibles, de mouvements mesurables en surface et en profondeur, ainsi que la persistance de l'activité sismique en zone nord-est et sud-est, justifie un maintien de la vigilance au niveau actuel et la nécessité de maintenir l'ensemble des capteurs en place, à objectifs inchangés.

4. Bilan de fonctionnement du système Telsite pour l'année 2010

La fonction de génération d'alerte du système TELSITE et sa diffusion sur site a été assurée toute l'année 2010 sans défaillance.

99,33% des données sismiques ont été récupérées dont 99.63% dans un laps de temps inférieur à 5 minutes.

Le nombre de jours d'interdiction d'accès en zone s'élève à 11 jours (14 jours en 2009). Ces jours de restriction d'accès ont été motivés :

- A titre préventif, en raison de problèmes de télécommunications entre la métropole et Mururoa entraînant une perte de surveillance à distance du système (2 périodes de 48 heures et une période de 144 heures).
- En raison d'une alerte sismique intempestive due à la réinitialisation simultanée de deux coffrets numériseur (une période de 24 heures).

Des difficultés rencontrées sur la transmission satellite VSAT opérée par OPT (Office des Postes de Tahiti) ont engendré une indisponibilité, continue ou intermittente, du système de transmission nominal pendant 8 jours.

Actions correctives sur site : 6 jours

Deux missions de maintenance corrective du personnel CEA de PAMATAI ont été nécessaires en 2010 pour les raisons suivantes :

Du 16/02 au 18/02/2010 :

- Changement des batteries de la station GPS HOTEL,
- Dépannage du coffret numériseur CASSIN de la station IRENE affectant les stations IRNP (Géophone) et IRENE (Submer). La carte UC du coffret a été changée.

Du 29/11 au 01/12/2010 :

- Changement des batteries de la station ANEMONE
- Changement de l'antenne GPS du numériseur de la station FRAP
- On notera que durant cette mission, une expertise conduite par la société LTPP a été effectuée pour évaluer l'état de la digue Charlie, supportant le radome de la station GPS1.

Actions de maintenance préventive : 28hj

La mission de maintenance préventive a eu lieu du 24/04 au 11/05/2010. En complément des actions de maintenance annuelle classique, cette mission a permis :

- La mise en place en zone Irène d'un géophone trois composantes (PK5P) en tête de puits de la station géophone en profondeur IRNP. En cas de défaillance du capteur en fond de puits, cette station peut être basculée dans le système d'alerte moyennant une intervention sur site pour :
 - Procéder au re-câblage de la station et l'intégrer dans le système de surveillance
 - Modifier si nécessaire les paramètres de détection du numériseur CASSIN.

- La mise en place définitive du système de télécommunication BGAN EXPLORER 700 en remplacement du système INMARSAT M4.
 - La mise en place d'un caillebotis métallique sur la digue Charlie pour accéder en toute sécurité au radome de la station GPS1.
 - Le déploiement, à titre expérimental de 4 réflecteurs radar trièdres (tous les 4 en zone nord, entre les PK 7 et 12), destinés à servir de repères pour l'imagerie radar. Ce dispositif, totalement passif, est constitué de surfaces plates disposées de façon à former un coin dont les arêtes se coupent à 90°. Ces objets constituent des réflecteurs permanents dont l'intérêt est de rehausser le signal radar pour la mesure de la déformation de terrain à partir de satellite. L'expérience vise à évaluer la capacité de ce système à mesurer les déformations du sol dans le contexte particulier de l'atoll de Mururoa. Des tests sont effectués en parallèle en métropole.
 - La mise en place sur les machines d'acquisitions d'un agent de surveillance qui surveille et relance automatiquement si besoin les tâches d'acquisitions des signaux des 6 stations GPS. On peut d'ailleurs noter une amélioration des taux de disponibilités des signaux des stations GPS à partir de mai 2010.
-

5. Perspectives 2011-2015 : Maintenance, Etudes

5.1. Entretien des installations TELSITE

5.1.1.Mission de maintenance

Pour 2011, la mission de maintenance préventive annuelle aura lieu du 29 mars au 11 avril. Les missions de maintenance préventive seront poursuivies.

5.1.2.Fiabilisation de la liaison M4

La liaison de secours M4 a tendance à se bloquer relativement souvent. Lors de la mission de maintenance 2009, une nouvelle technique à partir du service BGAN d'Inmarsat a été mise en place en parallèle de la liaison M4 pour tests (couverture satellite du Pacifique prévue en 2009).

5.1.3.Liaison VSAT Mururoa :

En projet pour l'année 2012, il est envisagé le remplacement de la VSAT opérée par l'OPT par une VSAT opérée par France TELECOM, sur un modèle d'exploitation identique à celui utilisé pour les stations OTICE du DASE.

Cette solution amènerait des modifications de l'architecture du système en base arrière. Les réflexions sur ce sujet doivent être approfondies.

Les premiers tests VSAT France TELECOM auront lieu à partir de mars 2011 pour valider le service.

5.1.4.Capteurs de submersion

Dans le cadre de la maintenance préventive des équipements, le remplacement des capteurs de submersion (corps + capteur) est envisagé pour la mission de maintenance 2012.

5.1.5.Rénovation du système de centralisation sur site

Les Unités de Transmission et de Stockage (UTS) assurant la centralisation de données du système TELSITE ne posent pas de problèmes actuellement. Mais en cas de besoin, le matériel devenant obsolète, on ne saura pas faire évoluer les UTS actuelles. Une action de remplacement par des systèmes standard (SMAD), développés au DASE, pourrait être envisagée dans les 3 à 5 ans.

5.1.6.Installation de stations de surface de secours

En 2006, une station de surface destinée à pallier préventivement une défaillance des géophones implantés au PK5 a été installée. Elle n'est pas raccordée au système d'alerte, mais peut être basculée sur celui-ci si le géophone venait à être perdu. Les géophones sont en place depuis 1994 et sont donc implantés depuis une durée plus longue que la durée de vie de ceux qu'ils avaient remplacés (soit une dizaine d'années). L'installation de stations de surface, en tête de puits des stations Camélia, Françoise et Simone7 est prévue en 2012. L'objectif de l'installation de ces stations est double : 1) Assurer un secours en cas de

perte inopinée d'un géophone en profondeur ; 2) Acquérir du bruit de fond afin de permettre des comparaisons surface/profondeur.

5.2. Réflexion sur le remplacement des capteurs défectueux

Certains signes de vieillissement commençant à apparaître (blocage de câble en forage incliné, usure de câbles de mesures), à la demande de la C3S, une réflexion sur l'évolution de l'instrumentation en profondeur installée il y a 15 ans a été entreprise (réf . 23,25). Une note d'orientation pour la rénovation de l'instrumentation en profondeur dans les 5 ans sera effectuée. Ce projet prendra en compte dans le même temps la mise à niveau du système de centralisation des mesures au niveau du PCT à Mururoa.

5.3. Compléments de calculs d'effets hydrauliques

La compétence sur les logiciels de calcul concernant les effets hydrauliques en zone proche et sur des atolls voisins devra être conservée.

5.4. Veille scientifique en imagerie satellitaire

Les actions portant sur l'acquisition d'images satellites ainsi que la veille scientifique sur les techniques satellitaires et leur apport commencées depuis 2008 seront poursuivies.

5.5. CONCLUSION POUR LES PERSPECTIVES

La localisation des événements sismiques sera poursuivie.

L'analyse des prises de vues réalisées par drone lors de la campagne 2010 sera réalisée en 2011-2012.

Une étude pour la rénovation de l'instrumentation en profondeur est en cours. En parallèle, l'installation de capteurs sismiques de surface sera poursuivie en 2012 pour pallier des déficiences inopinées des géophones en profondeur et acquérir des données communes en surface et profondeur.

6. Bilan d'Instrumentation de l'atoll de référence Rangiroa sur 7 ans

6.1. *Rappel des objectifs*

Compte tenu de la tendance au ralentissement de la vitesse d'évolution géologique qui se poursuit depuis de nombreuses années, les performances des moyens de mesures disponibles risquent de devenir insuffisantes pour quantifier l'activité géologique résiduelle de Mururoa. Une solution intéressante consiste à comparer les observations réalisées à Mururoa avec des observations de même type réalisées sur un autre atoll n'ayant pas été sollicité par des explosions. Il a donc été décidé d'instrumenter un site de référence.

Ce site doit présenter le maximum de similitudes géologiques avec l'atoll de Mururoa afin de pouvoir observer et mesurer des paramètres comparables. Dans l'analyse des phénomènes morphologiques et structuraux, on doit s'attacher à différencier les phénomènes associés à une réelle activité géomécanique de ceux associés aux effets de cyclones et tempêtes, tels les blocs cyclopéens présents sur certains atolls. Les critères de sélection, de similitude et description géomorphologique, exposés dans le document (réf. 6), nous ont amenés à choisir l'atoll de Rangiroa.

On peut observer sur la Figure 26 un plan de l'atoll donnant une indication sur sa géomorphologie et l'implantation des sites remarquables ou instrumentés. La Figure 27 avec des photographies prises sur site permet d'apprécier la morphologie du platier.

Compte tenu des contraintes logistiques et du besoin d'étayer l'analyse de similitude avant d'envisager une instrumentation plus lourde, on a limité l'action 2001 à une adaptation des stations de surveillance sismique existantes de Rangiroa. La préparation du génie civil a été réalisée fin 2001 et la mise à hauteur des systèmes a été réalisée en mars 2002.

Cette adaptation de l'instrumentation de Rangiroa avait pour objectif d'atteindre des capacités de détection et de caractérisation proches des stations de surface à Mururoa. Pour ce faire, on a déplacé la station PMO (ou PMOR) vers la côte pour se rapprocher du secteur fracturé au nord ouest de Rangiroa.

Cette station a été équipée de sismomètres trois composantes. Comme la station VAH au sud, PMO voit sa fréquence d'échantillonnage passer à 100Hz. Le système de transmission local avec Avatoru a été remplacé par un système numérique – pour PMO via un relais à son ancien emplacement - et la centralisation locale a évolué vers une configuration standard.

Cette instrumentation rénovée ne devrait cependant permettre d'enregistrer que les événements sismiques les plus forts, de façon analogue à ceux enregistrés en zone nord-est de Mururoa par les stations sismologiques de surface.

Une activité sismique, bien que très faible, est malgré tout enregistrée en 2005, 2007 et 2009. Nous reportons ci-dessous (cf. § 6.2) le bilan des observations sismiques sur la période 2003-2010.

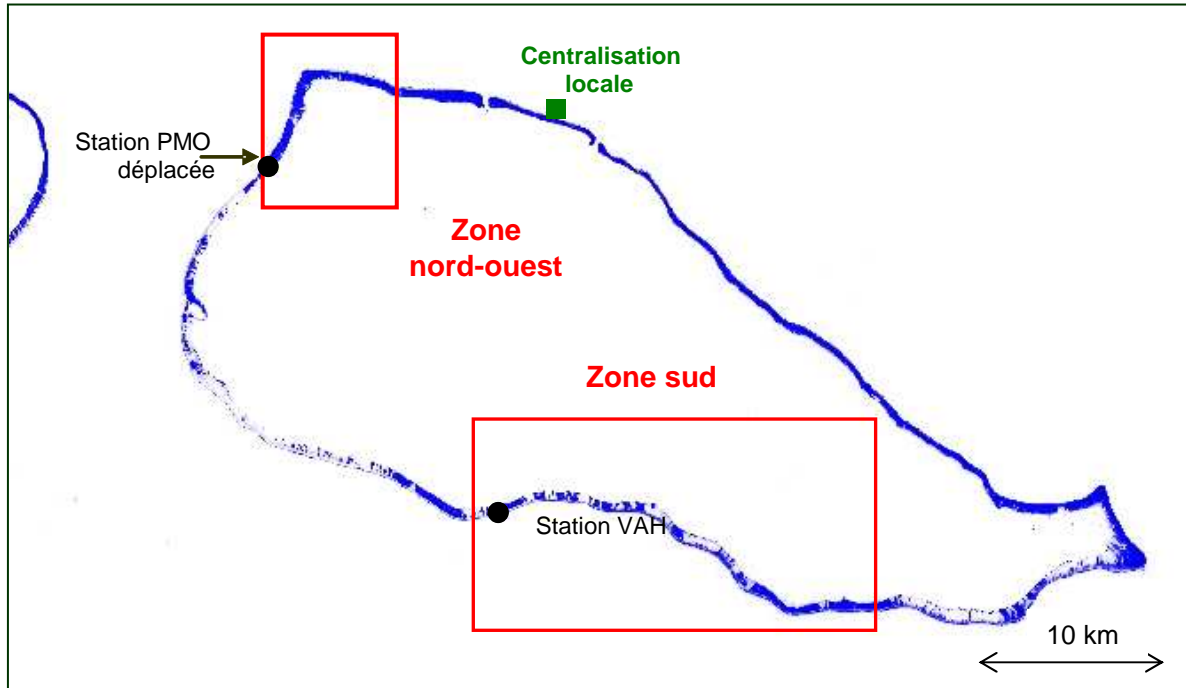


Figure 26 : Image SPOT de Rangiroa avec la position des sites et des stations existantes. Au nord-ouest est visible une portion de l'atoll de Tikehau.

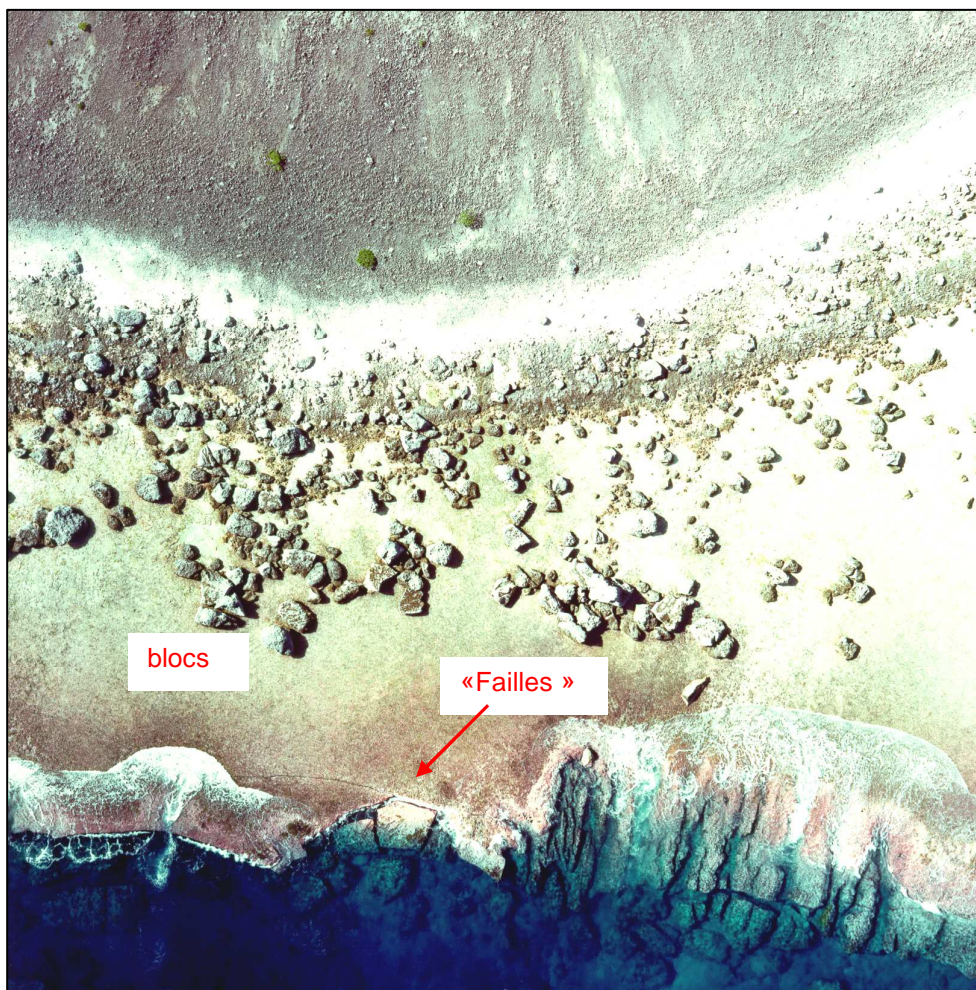


Figure 27 :
Vue de
Rangiroa.
Photographie
aérienne du
platier en
zone nord-
ouest prise
en 1981.

6.2. Bilan de sismicité de janvier 2003 à fin 2010

Quelques séismes localisés en bordure du plateau des Tuamotu et de magnitudes comprises entre 1 et 3.1 ont été détectés par le RSP (Réseau Sismique Polynésien) sur la période 2003-2010, le séisme le plus proche est situé à plus de 45 km de la station de PMO.

En 2005, un signal détecté uniquement sur la station PMO (le 1/07/2005), d'une durée de 13 minutes, et interprété tout d'abord comme une onde T, a été révisé : il s'apparente à un petit éboulement ou à des chutes de blocs détachés des flancs de l'atoll, événement de nature telle qu'on peut en observer à Mururoa (comme celui du 19/03/2006). Dans le cas de Rangiroa, il s'agit du premier événement local détecté depuis la création des 4 stations installées en 1967. Son amplitude est cependant très faible (0,16 $\mu\text{m/s}$ crête à crête). Il n'est détecté que par une seule station et il n'est pas possible de le localiser.

Fait très exceptionnel, une vingtaine de microséismes ont été détectés sur la station de PMOR entre le 1^{er} août et le 25 septembre 2007 (Figure 28), ceci n'était jamais arrivé depuis l'existence de la nouvelle station de PMOR (réf.13). Visibles sur une seule station (PMOR) ces événements sont très difficilement localisables. Ils sont situés tout au plus à 1 kilomètre de la station de PMOR.

La séquence a démarré par une douzaine d'événements entre le 1^{er} et le 3 août, suivie de quelques relâchements de contrainte (RC) isolés les 4, 12, 17 août, et puis 7 et 14 septembre. La séquence s'est terminée par une « rafale » finale d'une dizaine de RC en deux séquences le 25 septembre (Figure 28). Tous ces relâchements de contrainte ont des formes d'onde très similaires, et proviennent donc d'une source commune et ponctuelle. Les plus forts de ces événements ont eu lieu le 2 août et le 25 septembre 2007, mais il est à noter que les amplitudes sont très faibles (souvent inférieure à 1 nm, la plus forte fait 20 nm).

Les relâchements de contrainte finaux en petites rafales (Figure 28) s'étalent sur 2 minutes entre 13h42 et 13h44 TU (soit 03h42 en heure locale). Les ondes Pg sont difficilement observables, car de faibles amplitudes, et donc seules les ondes Sg sont nettement visibles. Le filtrage optimal pour une meilleure visualisation se situe dans la bande [3- 12 Hz].

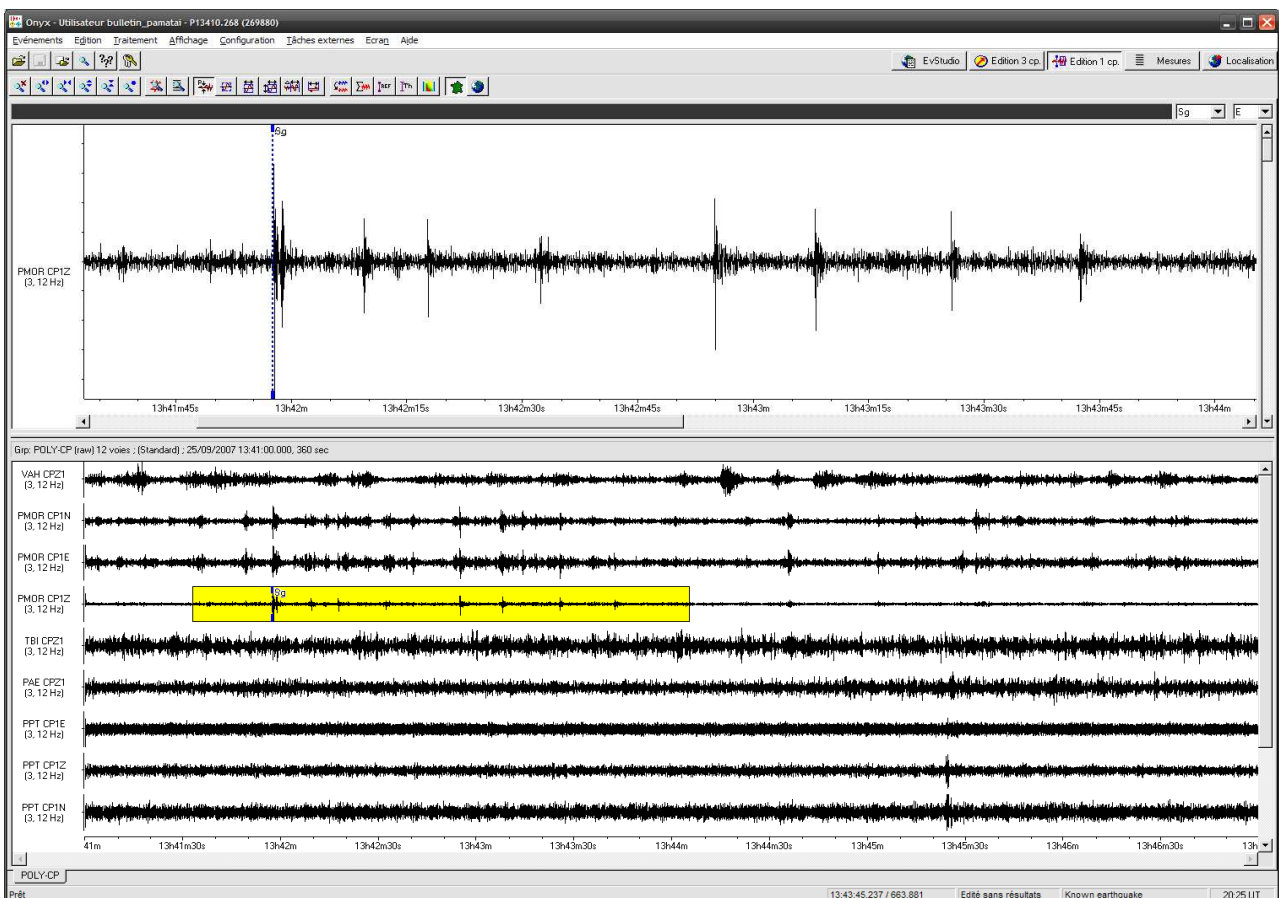


Figure 28: Première séquence de la rafale composée de 8 petits événements du 25/09/2007 vers 13h41 : les amplitudes des ondes Sg ne dépassent pas 4 nanomètres ; les ondes Pg sont à peine visibles. La durée individuelle d'un microséisme est d'environ 3.5 s. (réf.13).

Aucune activité sismique n'a été détectée en 2008. Un événement sismique local de type relâchement de contrainte a été détecté sur la station PMOR le 21 mars 2009 (Il est localisé à environ 1 à 2 km dans une direction nord-est ou sud-ouest de la station). Cet événement, d'amplitude d'environ 10 $\mu\text{m/s}$, montre que des événements sismiques semblables à ceux observés à Mururoa sont susceptibles de se produire sur d'autres atolls.

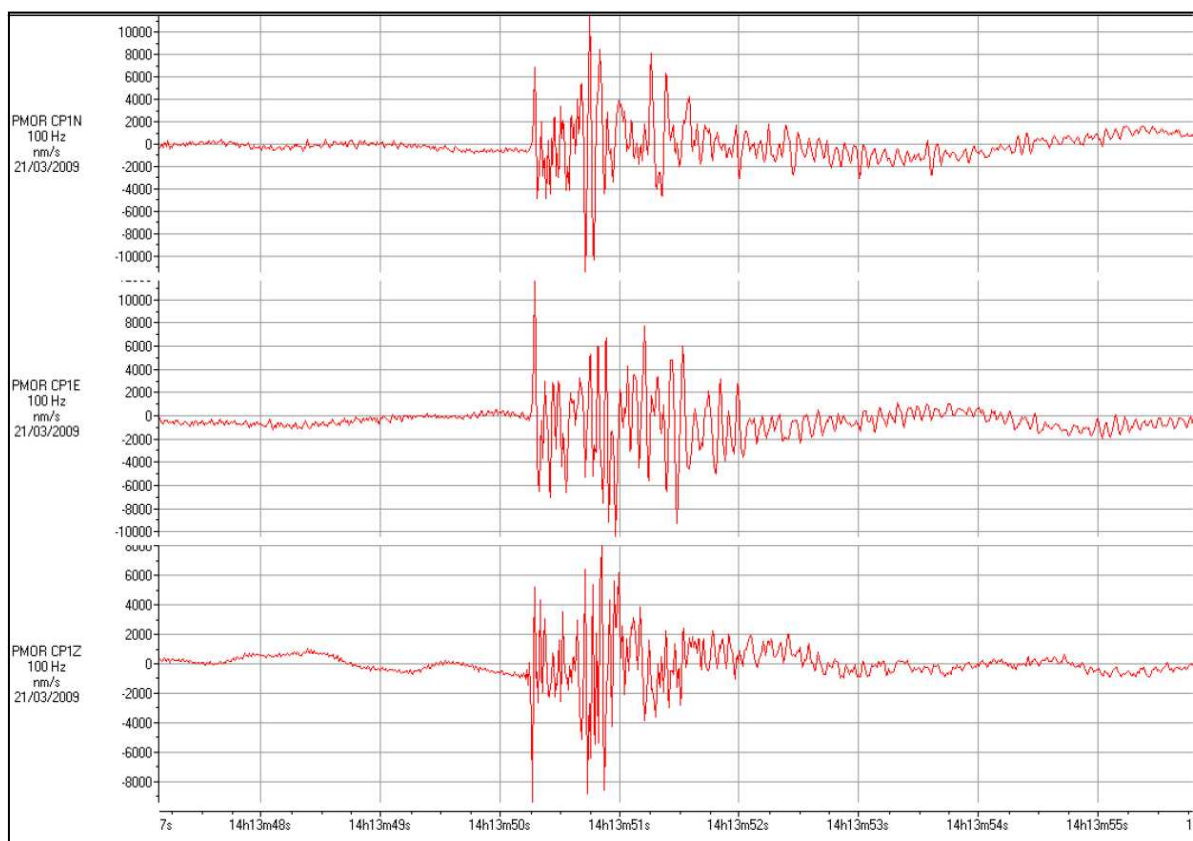


Figure 29 : Signaux de l'événement sismique détecté le 21 mars 2009 à Rangiroa par la station PMOR.

6.3. Bilan de sismicité locale à Rangiroa en 2010

En 2010, aucun séisme n'a été localisé dans le rectangle (14.0S-15.7S, 148.3W-146.9W). Aucun éboulement n'a été détecté sur PMO ou VAH. Cependant, trois événements proviennent sans doute de cette région.

Le 7 juillet 2010, 9h42 UTC : un faible signal sur PMO est observé, avec une différence S-P de 9.32 secondes (soit environ 90 km de distance), absent de VAH et de Tahiti. Il s'agit probablement d'un séisme localisé au nord de Rangiroa.

Les 18 octobre 2010, 18h32 UTC et 22 octobre 2010, 8h56 : dans les 2 cas, un très faible signal sur PMO est observé ; sa nature sismique est douteuse, il peut s'agir d'un bruit voisin de la station.



Figure 30 : Carte de la région de Rangiroa.

6.4. CONCLUSION POUR L'ATOLL DE REFERENCE

Depuis la création de la station, en 2002, un éboulement probable, détecté en juillet 2005, ainsi qu'une séquence de quelques petits relâchements de contrainte en août 2007, ont été détectés par la station PMOR. Un événement d'amplitude plus importante a toutefois été détecté en 2009 et confirme que des événements sismiques peuvent se produire sur d'autres atolls que les anciens sites d'expérimentation. Des événements de ce type sont les premiers observés. Ces faits restent très exceptionnels, et bien que les amplitudes de ces événements soient faibles ou extrêmement faibles, il apparaît intéressant de poursuivre l'exploitation de la station avec un maintien du pas d'acquisition à 100 Hz.

La surveillance de l'atoll de Rangiroa étant mentionnée dans le guide de surveillance géomécanique, comme l'une des mesures à mettre en œuvre pour le suivi des atolls, la commission C3S a donné en 2007 un avis favorable pour le maintien de la station.

7. Liste des figures

- Figure 1 : Carte de l'atoll de Mururoa avec les zones surveillées et les points instrumentés..... 9
- Figure 2 : Schéma général du fonctionnement du système de surveillance automatique TELSITE. 9
- Figure 3 : Détail de l'implantation de l'instrumentation de la zone nord-est de Mururoa. Les traits gris terminés d'un cercle côté océan représentent la position des digues. 10
- Figure 4 : Coupe représentant les principaux types de mesures réalisées en zone nord-est à Mururoa par le système TELSITE. Les déplacements en surface sont mesurés par les stations GPS. Les mesures de l'activité sismique sont effectuées par 4 géophones en profondeur et 2 stations sismiques en surface. Les mesures de déformation des flancs en profondeur sont effectuées par les câbles implantés en Forages Inclinés Latéraux (FIL) et par la chaîne inclinométrique. Les courbes en pointillés figurent des limites hypothétiques (de principe) des zones en mouvement. 11
- Figure 5 : Répartition de l'activité sismique en zone nord-est par zone et par année (barres) et nombre d'événements par semaine (courbe bleue). 13
- Figure 6 : Répartition temporelle par zone géographique, des magnitudes locales ML déterminées à partir des amplitudes automatiques des relâchements de contrainte détectés. Les événements attribués à la zone Gisèle sont répartis dans les zones Françoise ou Camélia. Le diagramme des magnitudes correspondant à la zone sud-est (Simone), est également présenté. 13
- Figure 7 : Courbes du nombre d'événements cumulés par zones en zone nord-est de 1997 à fin 2010. Les flèches indiquent les occurrences des événements ayant déclenché des alertes. 14
- Figure 8 : Distribution du nombre de relâchements de contrainte (en pourcentage) détectés en zone nord par le réseau TELSITE sur la période 1997- 2010, en fonction de leur magnitude locale ML... 15
- Figure 9 : Courbes cumulatives des énergies (courbes colorées, axe de gauche) et magnitudes locales ML pour tous les événements (triangles, échelle axe de droite) en zone nord-est, pour chacune des principales zones en mouvement (relation 1). Les magnitudes ML sont déduites des amplitudes automatiques de la base de données. Les événements étiquetés correspondent à ceux ayant déclenché l'alerte. Ils sont de magnitudes supérieures ou égales à 1,5 et se produisent tous en zone Françoise à l'exception de celui du 11/10/2007 localisé en zone Camélia. 17
- Figure 10 : Historique de la répartition spatiale de la microsismicité en zone nord-est (cercles colorés par périodes et par année à partir de 2005). Les étoiles représentent les événements ayant déclenché une alerte sismique. 19
- Figure 11 : Projection en coupe, dans la direction Nord, de la position des événements sismiques localisés dans le secteur Irène de 2000 à décembre 2010 (cercles colorés par année), compris dans une bande large de 750 m de part et d'autre du profil qui recoupe la station sismique IRNP en profondeur (triangle noir). Le triangle noir en surface représente la position de la
-

station géophone complémentaire (PK5P). Les traits gris obliques représentent la position des FIL.....	20
Figure 12 : Projection en coupe, dans la direction N45°, de la position des événements sismiques localisés dans le secteur Camélia, de 2000 à décembre 2010 (cercles colorés par année), compris dans une bande large de 750 m de part et d'autre du profil qui recoupe la station sismique CMLP en profondeur (triangle noir), L'étoile correspond à l'événement du 11/10/2007 ayant déclenché une alerte dans cette zone. Les traits gris obliques représentent la position des FIL.....	21
Figure 13 : Projection en coupe, dans la direction N45°, de la position des événements sismiques localisés dans le secteur Française, de 2000 à décembre 2010 (cercles colorés par année), compris dans une bande large de 750 m de part et d'autre du profil qui recoupe la station en profondeur FRAP (triangle noir). Le triangle noir en surface représente la position de la station géophone complémentaire (PK11P). Les étoiles correspondent aux événements ayant déclenché les alertes de fin 2006 et 2009 (1 : 27/11/2006 ; 2 :29/11/2006 ; 3 : 2/12/2006 ; 4 : 12/01/2007 ; 6 : 15/09/2009 ; 7 : 19/09/2009). Les traits gris obliques représentent la position des FIL.....	22
Figure 14 : Diagramme du moment sismique (en dyne.cm) en fonction du rayon de source (en km) pour les séismes de Mammoth lakes (California) (cercles pleins). Les autres symboles représentent d'autres sites d'études (Archulera et al., 1982).	25
Figure 15 : Diagramme des moments sismiques (Mo) en fonction des rayons de source dans le cas du site de Lacq (Feignier et Grasso, 1991).	25
Figure 16: Evolution du déplacement relatif à la station Jeanne dans la direction nord, mesuré par la station GPS1 implantée en surface et en bout de digue au centre de la zone Camélia, de juin 1990 à fin 2010.	26
Figure 17 : Déplacements mesurés de 1997 à janvier 2011 par les câbles implantés dans les forages inclinés dans les zones Française, proche du PK10 (courbes rouges FIL à 45°et 40°), Irène, proche du PK5 (courbes bleues : FIL à 45° à 30°) et Camélia, proche du PK8 (courbes vertes : FIL à 40° et 30°).....	29
Figure 18 : Evolution du capteur inclinométrique du forage GEO8B (n°29) en zone Camélia implanté dans les dolomies à 350m de profondeur.....	30
Figure 19 : Evolution du capteur inclinométrique du forage GEO8B (n°26) en zone Camélia implanté à la base des calcaires crayeux à 376 m de profondeur.	30
Figure 20 : Evolution du capteur inclinométrique du forage GEO8B (n° 22) en zone Camélia implanté dans la partie supérieure d'une unité conglomératique sous les calcaires crayeux à 451 m de profondeur.....	30
Figure 21 : Carte des événements microsismiques localisés de 1990 à 2010 en zone Simone (localisation exhaustive sur la période 12/2005–11/2008).....	32

Figure 22 : Exemples de signaux de relâchements de contrainte observés par la station Simone située en zone sud-est de Mururoa, le 12 juin 2010.	33
Figure 23 : Vecteurs déplacements planimétriques des piliers topographiques et des piliers jalons 2001-2007 (flèches bleues) après recalage de la polygonale principale. Les courbes en pointillés roses et violets indiquent les limites de découpage de zones en mouvement (réf.10).	35
Figure 24 : Mécanisme de déformation des zones en mouvement Françoise (a), Camélia (b), Irène (c)..	37
Figure 25 : Image à 5cm de résolution en zone nord (digue HOTEL) acquise par drone en 2010.	39
Figure 26 : Image SPOT de Rangiroa avec la position des sites et des stations existantes. Au nord-ouest est visible une portion de l'atoll de Tikehau.	47
Figure 27 : Vue de Rangiroa. Photographie aérienne du platier en zone nord-ouest prise en 1981.....	48
Figure 28: Première séquence de la rafale composée de 8 petits événements du 25/09/2007 vers 13h41 : les amplitudes des ondes Sg ne dépassent pas 4 nanomètres ; les ondes Pg sont à peine visibles. La durée individuelle d'un microséisme est d'environ 3.5 s. (réf.13).	49
Figure 29 : Signaux de l'événement sismique détecté le 21 mars 2009 à Rangiroa par la station PMOR.	50
Figure 30 : Carte de la région de Rangiroa.	51

8. Références

8.1. **Rapports et ouvrages**

- 1 DIRCEN-CEA, Document n°12, Guide de Surveillance Géomécanique des Atolls de Mururoa et de Fangataufa, in *Geomechanical and Radiological Impact of Nuclear Tests at Mururoa an Fangataufa*, Paris, La Documentation Française, 1998.
 - 2 DIRCEN-CEA, Document n°6, Overall Distribution and Characteristics of the Underground Nuclear Tests Carried Out at Mururoa and Fangataufa and Their Effects on the Surrounding Media, in *Geomechanical and Radiological Impact of Nuclear Tests at Mururoa an Fangataufa*, Paris, La Documentation Française, 1998.
 - 3 DIRCEN-CEA, Document n°7, Structural Integrity and Stability of the Atolls ; Data and Modelling, in *Geomechanical and Radiological Impact of Nuclear Tests at Mururoa an Fangataufa*, Paris, La Documentation Française, 1998.
 - 4 Cahier des Charges relatif au soutien apporté par le Centre d'Expérimentation du Pacifique aux opérations de surveillance géomécanique et radiologique sur les sites de Mururoa et Fangataufa - Rapport DGA/DSP/SPNuc/SDAN/SCEN/DIR n°367 du 25 Octobre 1999.
 - 5 Guide de Surveillance Géomécanique des atolls de Mururoa et Fangataufa, édition d'avril 2001 (Guide et Annexes A à C), Note DASE/DO/386 du 12/6/01, et mise à jour de l'annexe B en Février 2002.
 - 6 Surveillance de l'évolution géomécanique de Mururoa et Fangataufa, Tome II, Evolution géologique, bilan Annuel 2002, CEA/DIF/DASE/DO 1225 du 05/12/2003, ENV.SURGE.R.BB.DET.CE.03.12.01.A.
 - 7 Cahier de recette des capteurs Telemac, CEA/DAM/DE Service TME, type d'appareil fissuromètre n°141, du 21/03/90.
 - 8 Réponses du DASE à la note DGA/PDNUM/SDAN/SCEN/DIR DO 256, « Mururoa et Fangataufa Bilan de la surveillance géomécanique » 2003 du 12 avril 2005, CEA/DIF/DASE/LDG DO 317 du 17/06/05.
 - 9 Evolution géomécanique des atolls de Mururoa et Rangiroa- Bilan 2004, CEA/DIF/DASE/LDG DO 364 du 05/07/05, ENV.SDURGE.R.BB.DET.CP.05.07.06.A.
 - 10 Etude de l'évolution géomécanique de Mururoa, Note de synthèse, CEA/DIF/DASE/LDG/DR 13 du 17/03/06.
 - 11 Evolution géomécanique de l'atoll de Mururoa et Rangiroa, Bilan 2005, CEA/DIF/DASE/LDG/302/2006/DO du 19/05/2006.
 - 12 Apport de la télédétection pour la surveillance géomécanique de l'atoll de Mururoa, CEA/DIF/DASE/LDG/DR 42 du 29/11/2006.
 - 13 Activité sismique exceptionnelle de l'atoll de Rangiroa du 1^{er} août au 25 septembre 2007 note LDG.PAC du 15/10/2007.
 - 14 Etude des effets hydrauliques liés à des glissements de terrain à Mururoa, CEA/DIF/DASE/LDG/50/2008 DR du 23/06/2008.
 - 15 Campagne topographique sur les atolls de Mururoa et Fangataufa, Auscultation géodésique, rapport de fin d'intervention, rapport SETIS, RFI T.TA.02 C, 25/03/2008.
-

- 16** Campagne topographique 2007 sur les atolls de Mururoa et Fangataufa, analyse des résultats, CEA/DIF/DASE/LDG/DO 550 du 01/08/08.
 - 17** Evolution géomécanique de l'atoll de Mururoa et Rangiroa, Bilan 2007, CEA/DIF/DASE/LDG/348/2008/DO du 9/05/2008.
 - 18** Guide de surveillance géomécanique des atolls de Mururoa et Fangataufa, CEA/DIF/DASE/LDG/734/2008/DO du 18/11/2008 (Guide) ; et Annexe A à C, CEA/DIF/DASE/STMG/DO239 du 3/12/08.
 - 19** Pré étude de cartographie et de mesures des failles du CEP par imagerie très haute résolution, CEA/DIF/DASE/LDG/01/2009/DO du 5 janvier 2009.
 - 20** Note de justification pour un projet de cartographie pour le suivi de la fracturation sous-marine, CEA/DIF/DASE/LDG/DO 93 du 12/02/09.
 - 21** Evolution géomécanique de l'atoll de Mururoa et de Fangataufa, Tome II, Bilan 2008, n° 342/DGA/DO/UM NBC/SCEN du 1 juin 2010.
 - 22** Campagne photographique sur les atolls de Mururoa et Fangataufa, cahier des clauses techniques particulières, CEA/DIF/DASE/LDG DO 285 du 19/05/2009.
 - 23** Système Telsite- Réflexion sur le remplacement de capteurs défectueux en profondeur, CEA/DIF/DASE/LDG/440/2009/DO du 5 octobre 2009.
 - 24** Etude des effets hydrauliques liés à des glissements de terrain à Mururoa, note d'avancement, CEA/DIF/DASE/34/2010/DR.
 - 25** Réflexion sur les évolutions nécessaires des équipements en profondeur, CEA/DIF/DASE/LDG/449/2010, du 16/10/2010.
 - 26** Campagne Photographique sur les Atolls de Mururoa et Fangataufa, rapport de mission effectuée du 14 octobre au 8 novembre 2010, CEA/DIF/DASE/LDG/45/2011/DO du 4 février 2011.
-

8.2. Bibliographie

- Archuleta R.J., Cranswick R., Muller C., and Spudich P., Source parameters of the 1980 Mammoth Lakes, California, earthquake sequence, *J. Geophys. Res.*, 87, 4595-4607, 1982.
- Brune J., Tectonic Stress and the Spectra of Seismic Shear Waves from Earthquakes, *J. Geophys. Res* VOL. 75, NO. 26, 1970.
- Feignier B., Grasso J.R., Relation between Seismic Source Parameters and Mechanical Properties of Rocks : A Case Study, *PAGEOPH*, Vol. 37, No. 3, 1991.
- Gutenberg B. and C.F. Richter, Earthquake magnitude, intensity, energy and acceleration, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 46, 105-145, 1956.
- Madariaga R., Dynamics of an expanding circular fault. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 65, 163-182, 1976.
- Thatcher. W., Hanks, T.C., Source Parameters of Southern California Earthquakes, VOL. 78, NO. 35, *J. Geophys. Res.* Dec.10, 1973.
-