

**COMMISSARIAT À L'ÉNERGIE ATOMIQUE**  
**DIRECTION DES APPLICATIONS MILITAIRES**  
**CENTRE DAM ILE DE FRANCE**  
**DÉPARTEMENT ANALYSE SURVEILLANCE ENVIRONNEMENT**  
**SERVICE LABORATOIRE DE DÉTECTION ET DE GÉOPHYSIQUE**

**SURVEILLANCE DE L'ATOLL DE MURUROA**  
**ÉVOLUTION GÉOMÉCANIQUE DES ATOLLS**  
**DE MURUROA ET DE RANGIROA**



**TOME II**

**Évolution géologique**

**Bilan 2007**



Direction des Applications Militaires  
Centre DAM Ile de France  
Département Analyse, Surveillance, Environnement  
Service Laboratoire de Détection et de Géophysique



CEA/DIF/DASE/LDG  
DO 348

09/05/08



08RRBE000528

Diffusé le 27/05/08

**SURVEILLANCE DE L'ATOLL DE MURUROA**  
**EVOLUTION GEOMECANIQUE DES ATOLLS DE MURUROA**  
**ET RANGIROA**

**BILAN 2007**

**M. FLOUZAT, J.P. SANTOIRE, D. REYMOND**

**A-24100-00-11-PW-22**

**Date d'émission : 9 mai 2008**

**Nombre de pages : 65**

**ENV.SURGE.R.BB.DET.CP.08.05.09.A**

Vu et transmis  
Le Chef du D.A.S.E.

B. FEIGNIER

Le Chef du L.D.G.

R. CRUSEM

Commissariat à l'énergie atomique  
Centre DAM Île de France – DASE/LDG - Bruyères-le-Châtel – 91297 Arpajon cedex  
Tél : (33) - 01 69 26 54 71 - Fax : (33) - 01 69 26 71 30

Etablissement public à caractère industriel et commercial  
R.C.S. PARIS B 775 685 019

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

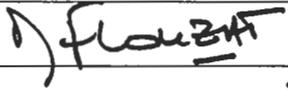
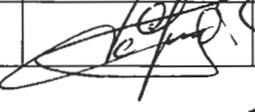
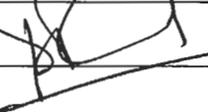
**FICHE DOCUMENTAIRE**  
**DAM**

<p><b>1 - Organisme Emetteur*</b></p> <p>Centre : <b>DIF</b></p> <p>Direction : <b>Ile de France</b></p> <p>Département : <b>DASE</b></p> <p>Service : <b>LDG</b></p> <p>Laboratoire :</p>	<p><b>2 - Classification *</b></p> <p style="text-align: center;"><b>DO</b></p> <p>*</p> <p>** SDNP, SD, CD, SC, CI, CC, DR, DO</p>						
	<p><b>3 - Référence à</b>                      Projet Surveillance du site de Mururoa EOTP A-24100-00-11-PW-22</p>						
<p><b><u>IDENTITE DU DOCUMENT</u></b></p>							
<p><b>4 - Nature</b></p> <p style="text-align: center;">R</p>	<p><b>5 - Identification</b></p> <table border="1" style="width: 100%;"> <tr> <td style="width: 50%;">Document Secret</td> <td style="width: 50%;">Autres documents</td> </tr> <tr> <td></td> <td style="text-align: center;"><b>348/DO</b></td> </tr> </table>	Document Secret	Autres documents		<b>348/DO</b>	<p><b>6 - Date</b></p> <p style="text-align: center;">9/05/2008</p>	<p><b>7 - Nbre de pages</b></p> <p style="text-align: center;">65</p>
Document Secret	Autres documents						
	<b>348/DO</b>						
<p><b>8 - Auteur (s) : M. FLOUZAT – J.P. SANTOIRE – D. REYMOND</b></p>							
<p><b>9 - Titre</b> <b>SURVEILLANCE DE L'ATOLL DE MURUROA -EVOLUTION GEOMECANIQUE DES ATOLLS DE MURUROA ET DE RANGIROA – BILAN 2007</b></p>							
<p><b>10 - Résumé</b></p> <p>Ce rapport présente le bilan annuel pour l'année 2007 de l'évolution géomécanique de l'atoll de Mururoa, ancien site 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.</p>							
<p><b>11 - Descripteur (s) proposé (s)</b></p> <p>Mots Clés : Mururoa, Telsite, Rangiroa, Géomécanique, Télésurveillance.</p>							

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

**SURVEILLANCE DE L'EVOLUTION GEOMECANIQUE  
DES ATOLLS DE MURUROA et de RANGIROA**

**BILAN 2007**

	REDACTEURS	APPROBATEURS		EMETTEUR
		TECHNIQUE	QUALITE	
NOM	M. FLOUZAT, J.P. SANTOIRE, D. REYMOND	S. LE GARREC	B. BENOIST	R. CRUSEM
UNITE	DASE/LDG	DASE/LDG	DASE/LDG	DASE/LDG
DATE DU VISA	15/05/08	19/05/08	16/05/08	20/05/08
VISA				

**CARTOUCHE DES EVOLUTIONS**

INDICE	DATE	REDACTEUR	MOTIF ET NATURE DES EVOLUTIONS
A	9/05/2008	M. Flouzat	Edition Initiale

# Evolution géomécanique des atolls de Mururoa et de Rangiroa

## Bilan 2007

### SOMMAIRE

1 - Rappels .....	5
Le suivi continu de l'évolution de Mururoa : le système TELSITE.....	5
Rappel des composantes du système TELSITE.....	6
Exigences en matière de fonctionnement du système TELSITE.....	6
Les campagnes complémentaires de caractérisation de l'évolution des atolls .....	7
2 - Bilan de l'évolution géologique mesurée en 2007 .....	11
Bilan de l'évolution de la zone nord-est de Mururoa issu des données TELSITE.....	11
Bilan de l'évolution des autres zones de Mururoa issu des données TELSITE .....	27
Etude de l'Evolution Géologique .....	29
Apport de l'imagerie optique et satellitaire.....	32
Campagne topographique quinquennale de mesures complémentaires.....	34
Compléments de calculs des effets hydrauliques en zone Irène.....	38
Bilan de fonctionnement du système et des fonctions d'alerte ; actions correctives .....	38
CONCLUSION POUR LE BILAN GEOMECANIQUE 2007 .....	40
3 - Perspectives 2008-2009 : Maintenance, Etudes.....	42
Entretien des installations Telsite.....	42
Compléments de calculs d'effets hydrauliques .....	43
Relocalisation des événements sismiques.....	43
Analyse de la fracturation sous-marine par photographies aériennes .....	43
CONCLUSION POUR LES PERSPECTIVES 2008-2009 .....	44
4 - Perspectives à moyen terme, Moyens minimaux à conserver.....	45
Remplacement des capteurs défectueux .....	45
Recherche de meilleures solutions de transmissions site-métropole :.....	47
Rénovation du système de centralisation sur site.....	48
Faisabilité du suivi des déformations par télémétrie radar .....	48
CONCLUSION POUR LES PERSPECTIVES A MOYEN ET LONG TERME .....	49
5 - Bilan d'Instrumentation de l' atoll de référence Rangiroa sur 2 ans .....	50
Rappel des objectifs .....	50
Bilan de sismicité de janvier 2003 à fin 2007 .....	52
CONCLUSION POUR L'ATOLL DE REFERENCE .....	58
6 - Liste des figures.....	59
7 - Références.....	62

## **1 - 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 (réf. [ 1], [ 2], [ 3], [ 21]). Une campagne d'observation périodique a été jugée suffisante.

### ***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 a été surveillé et étudié pendant 20 ans. Même si un glissement de masse important est peu probable, il reste indispensable de connaître en temps quasi réel toute évolution pouvant mettre en jeu la sécurité des personnes se trouvant sur place.

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 satellites, 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 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, 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.

Par ailleurs, des mesures permettant d'apprécier l'évolution géomécanique de l'atoll sont réalisées par 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 révélait une évolution anormale, des observations et analyses complémentaires seraient décidées et des mesures de protection spécifiques pourraient être prises sur site.

### ***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 3 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 inclinés 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.

Trois capteurs de submersion (zones Anémone, Irène et Viviane) complètent le dispositif. Ils sont destinés à mesurer la hauteur d'éventuelles vagues en cas d'éboulement.

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

### ***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 (réf. [ 4 ] et [ 5 ]).

La durée de vie de ce système de surveillance continue, mis en service opérationnel au début 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 désormais 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.

***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 ans.

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]).

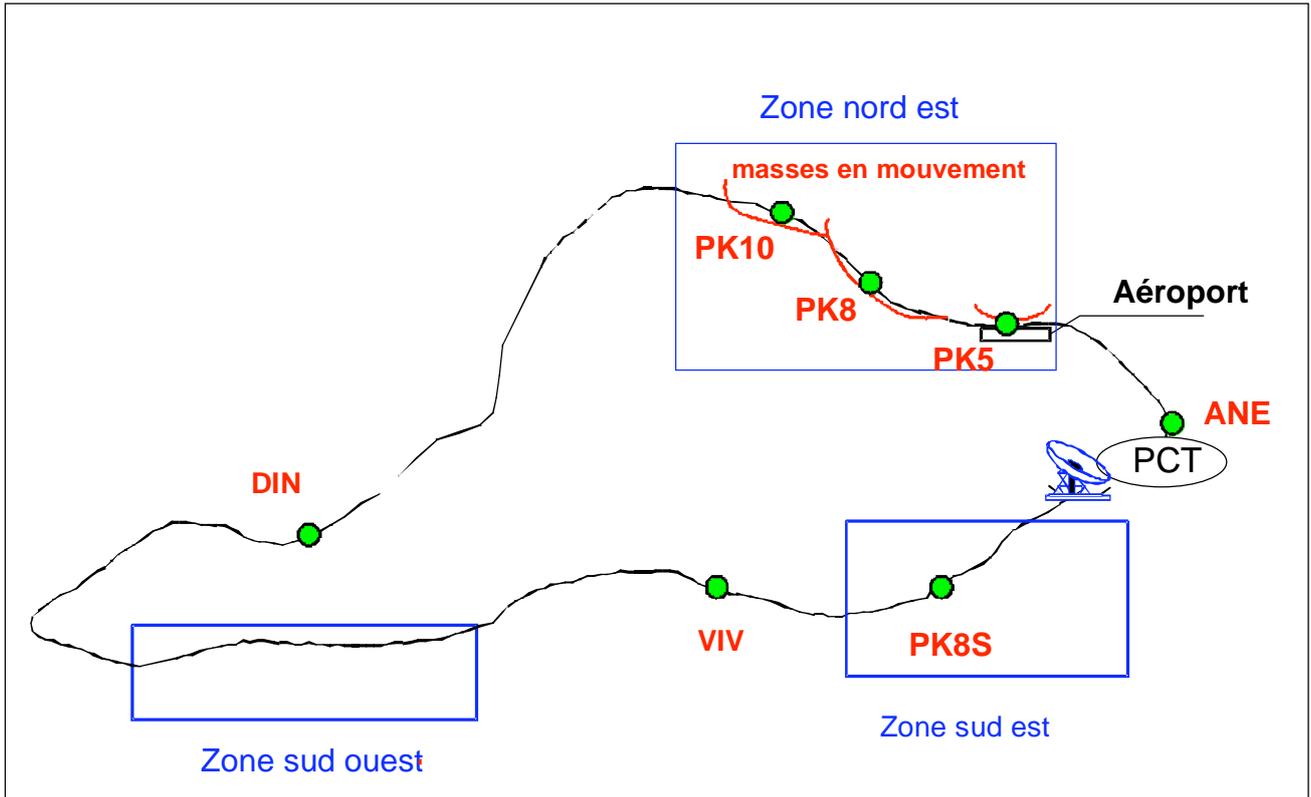


Figure 1 : Carte de l'atoll de Mururoa avec les zones surveillées et les points instrumentés.

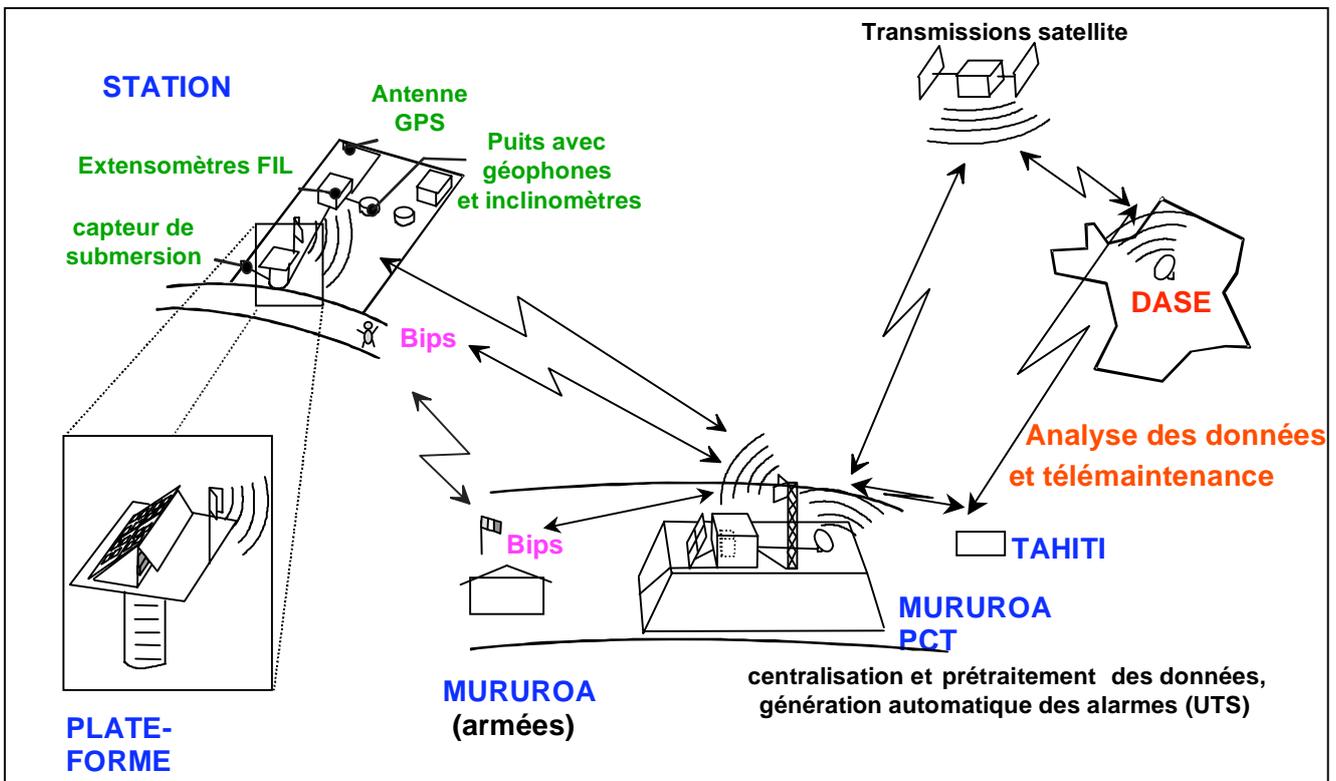


Figure 2 : Schéma général du fonctionnement du système de surveillance automatique TELSITE.

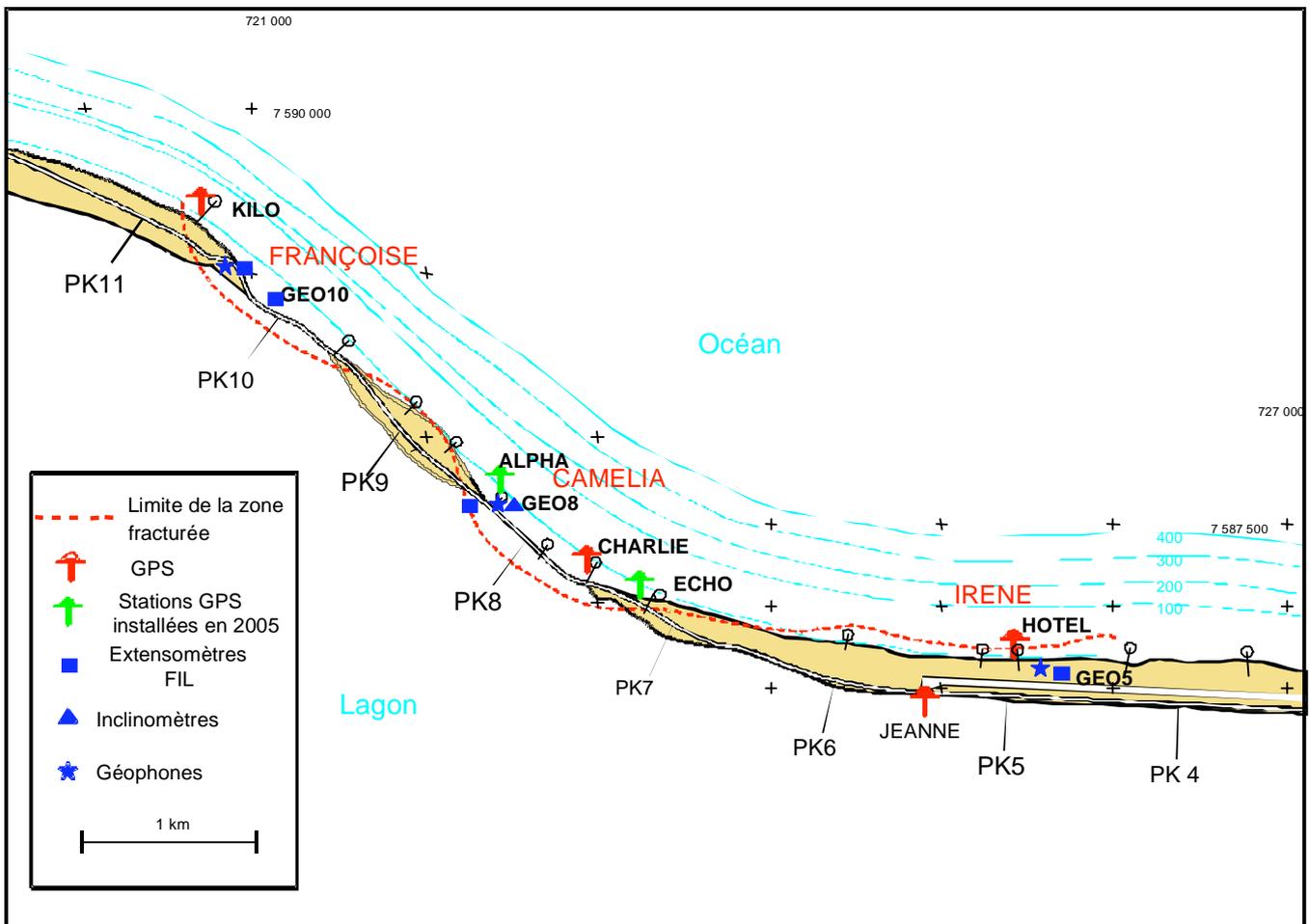


Figure 3 : Détail de l'implantation de l'instrumentation de la zone nord-est de Mururoa.

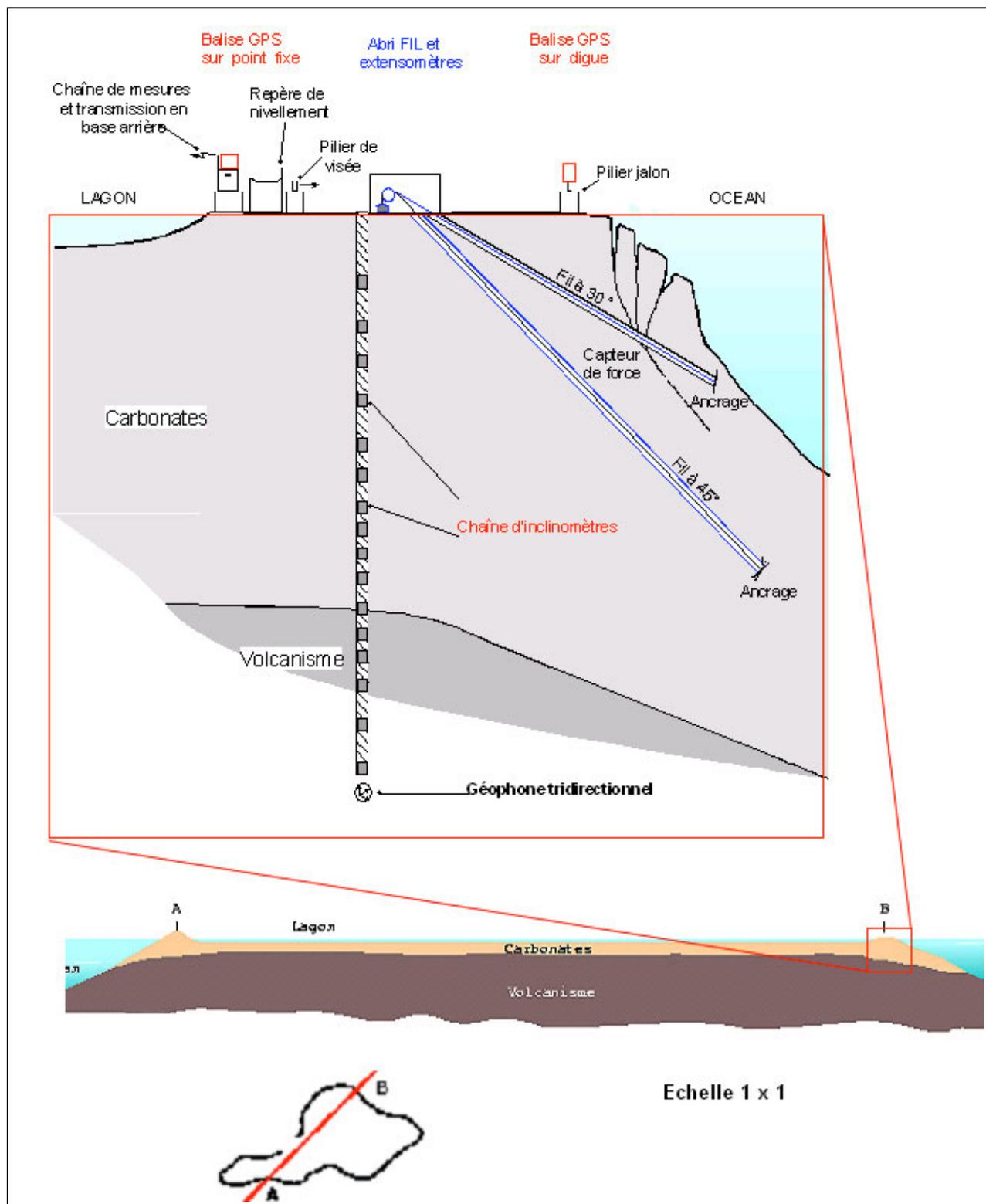


Figure 4 : Coupe représentant les principaux types de mesures réalisées en zone nord-est à Mururoa par le système Telsite. Les déplacements en surface sont mesurés par les stations GPS. Les mesures de l'activité sismique sont effectuées par 4 géophones en profondeur et 2 stations sismiques en surface.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

## **2 - Bilan de l'évolution géologique mesurée en 2007**

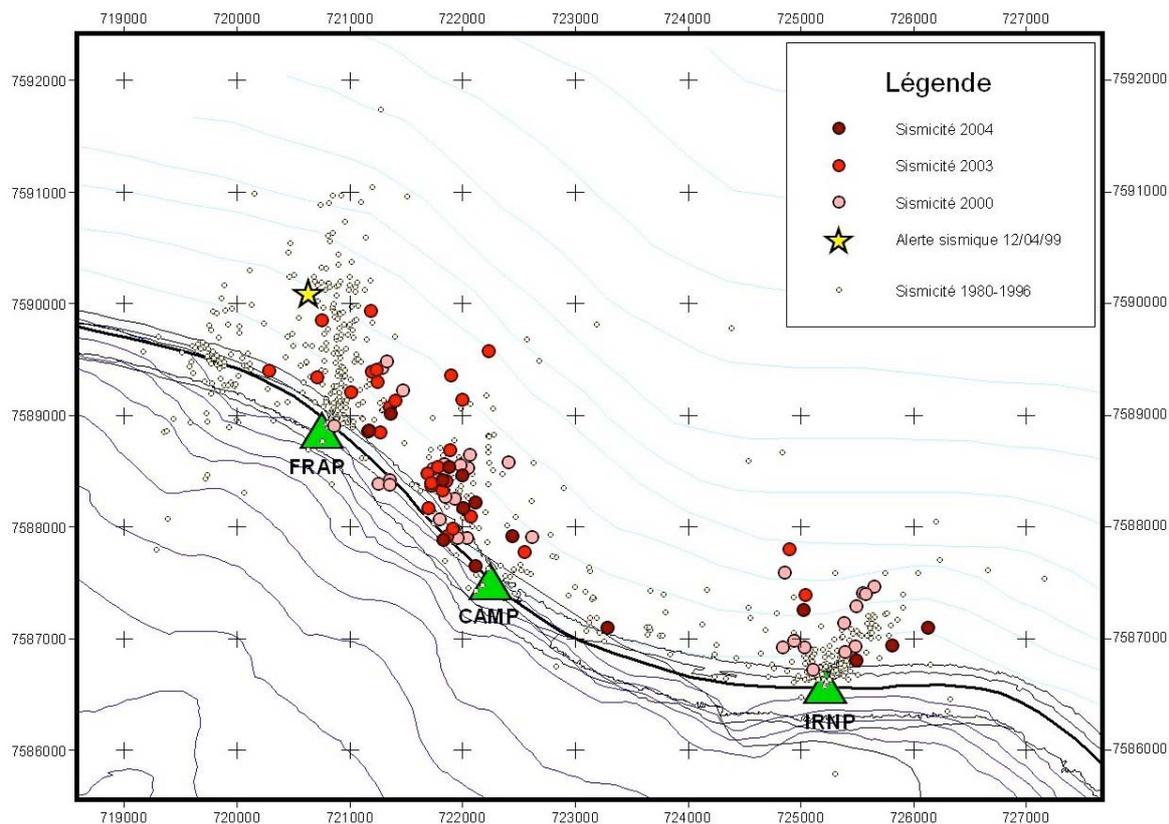
### ***Bilan de l'évolution de la zone nord-est de Mururoa issu des données TELSITE***

#### Historique de la répartition spatiale des événements

La mission principale du système Telsite est de couvrir l'alerte à 90 secondes par des mesures automatiques. Le système n'est pas donc pas destiné à une analyse aussi fine qu'auparavant. En effet, tous les événements sismiques détectés 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 relâchements de contrainte, mais ils ne font pas l'objet d'une localisation systématique. Seul un secteur géographique leur est attribué systématiquement en fonction des stations qui ont détecté l'événement (« PK5 », « Camélia », « Françoise », « Camélia-Françoise » pour la zone nord). Aussi, on ne dispose pas d'une analyse exhaustive de la sismicité avec localisation pour chaque événement détecté depuis l'installation du système TELSITE en 1997.

Une partie des événements détectés a fait cependant l'objet d'une analyse plus précise pour les années 2000, 2003, et la période de janvier à avril 2004 (Figure 5). Cela permet de constater que la sismicité reste similaire à ce qui était antérieurement observé et que celle-ci continue de se concentrer dans les mêmes zones, Irène, Camélia-Françoise, Françoise.

---



**Figure 5** : Historique de la répartition spatiale de la microsismicité en zone nord-est. Evénements localisés en 2000 (rose), 2003 (rouge) et de janvier à avril 2004 (rouge foncé). La sismicité antérieure à 1997 est représentée par les cercles gris.

#### Activité sismique

Comme pour les années précédentes, l'activité sismique enregistrée par les stations de surface et de profondeur s'est manifestée en 2007 plus particulièrement dans la zone Française (Figure 6), l'une des principales zones où se concentre la sismicité depuis de nombreuses années. En contrepartie, le nombre de microséismes, qui avait un peu augmenté en zone Irène en 2004, est resté à un niveau faible. En 2007, toutes zones cumulées, le nombre moyen de relâchements de contrainte sur l'année est de l'ordre de 4,5 par mois (proche de 1 par semaine), (Figure 6). L'année 2007 est plus calme que 2006 (5,3 événements par mois) pour ce qui est de la fréquence moyenne des événements. Cette valeur est cependant toujours un peu supérieure à la valeur observée sur la période 1995-1996, mais restent en deçà du seuil critique. Les magnitudes restent faibles ( $< 1.5$ ). Depuis mi-2004, la sismicité continue donc de présenter un caractère plus sporadique comme l'indique la courbe du nombre d'événements, alternant périodes de calme et de reprises d'activité (Figure 7).

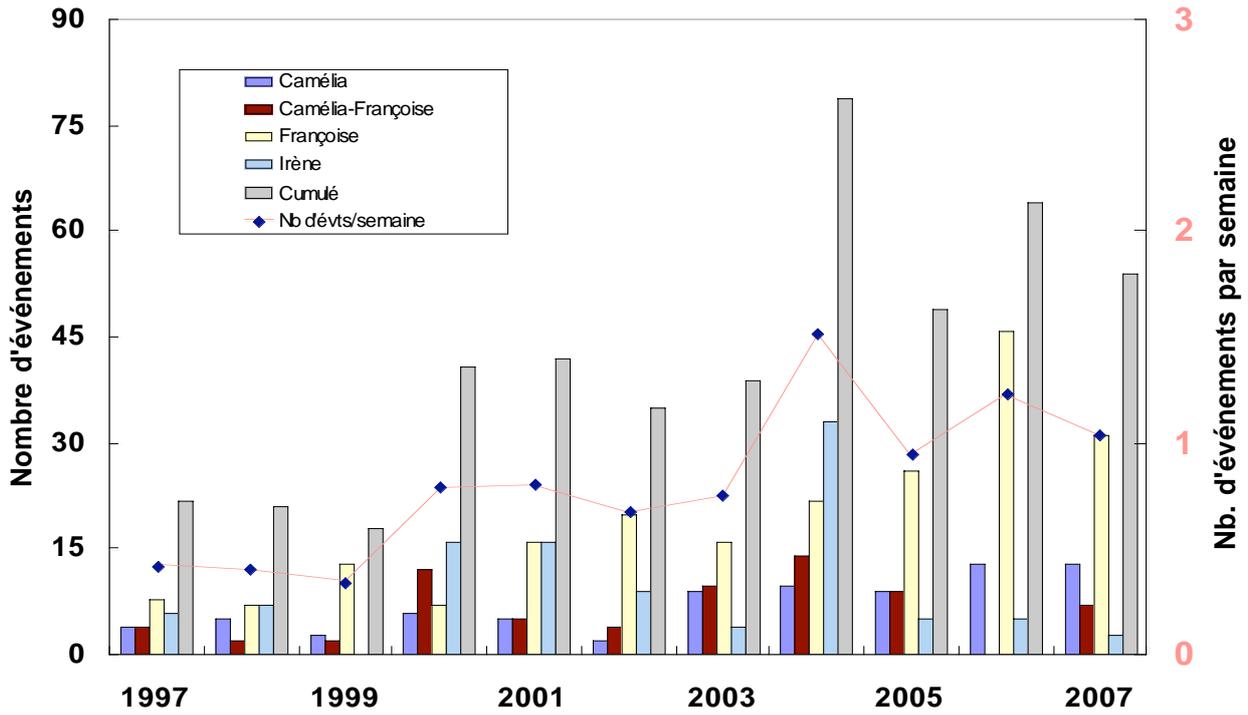


Figure 6 : Répartition par zone et par année (barres) et nombre d'événements par semaine (courbe rouge).

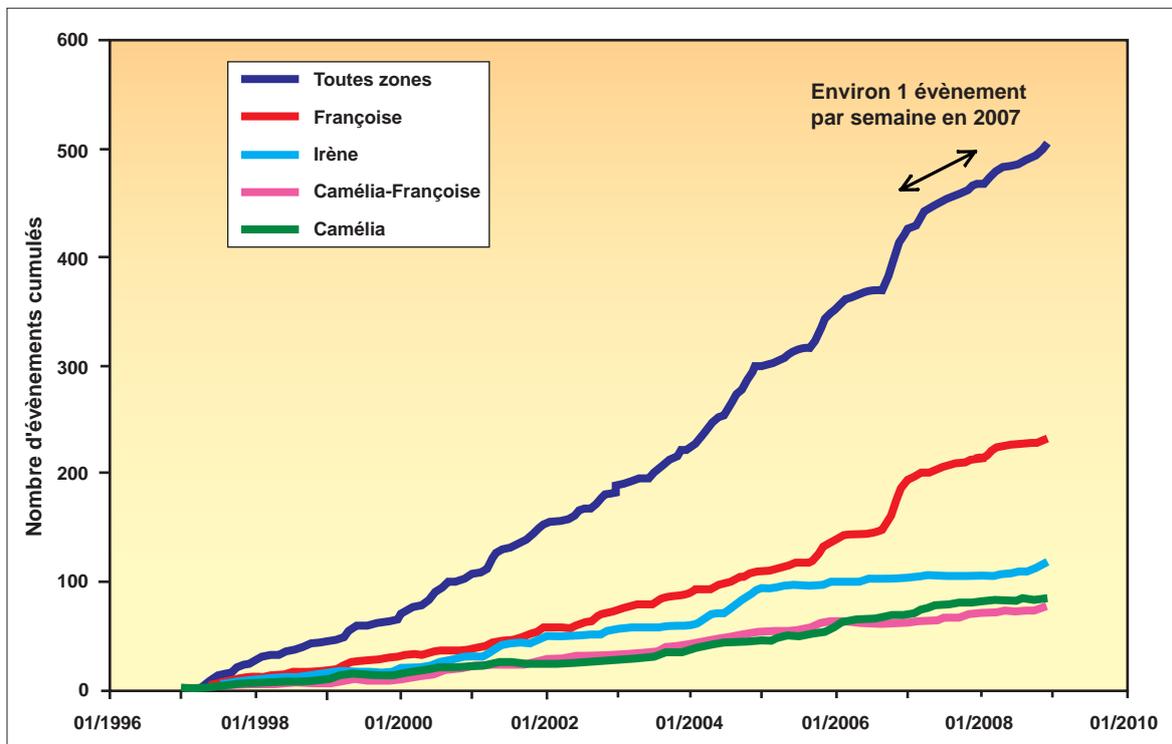


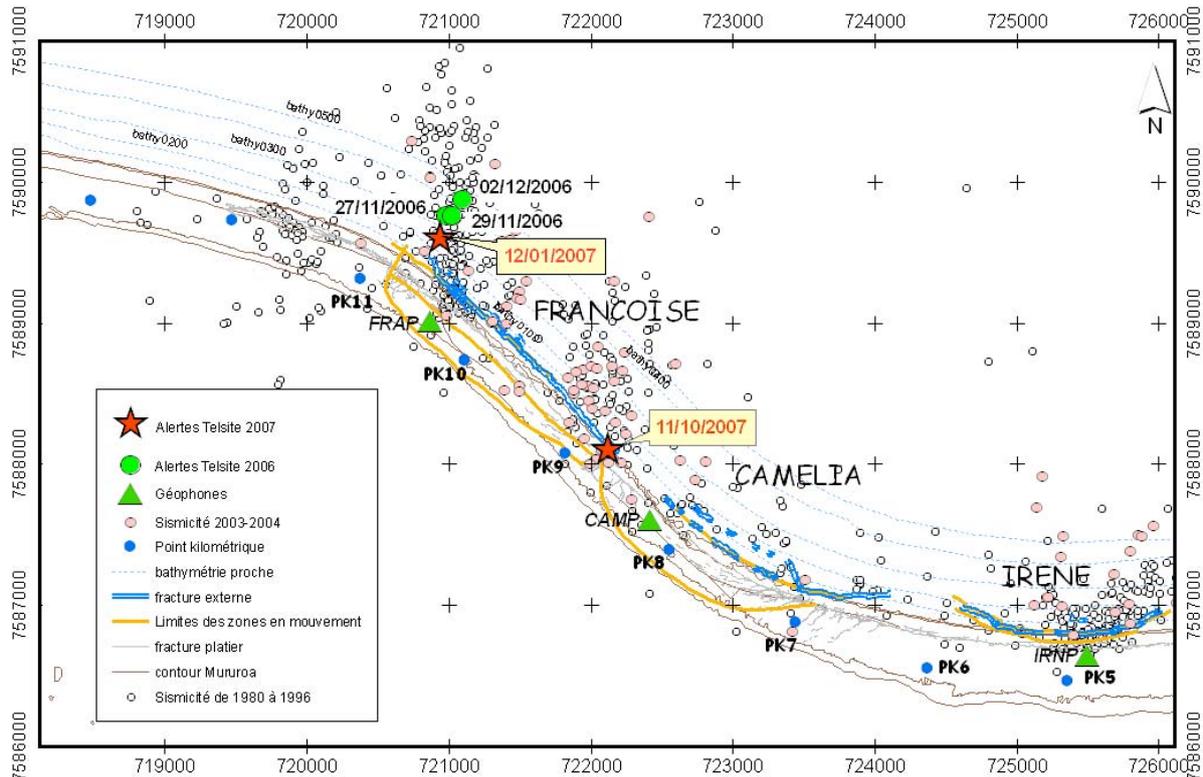
Figure 7 : Activité sismique cumulée en zone nord-est de Mururoa.

## Alertes Telsite

Deux événements ont déclenché l'alerte sismique en 2007, l'un en zone Française le 12 janvier, faisant suite à une série de 3 alertes fin 2006, le second en zone Camélia, le 11/10/2007 (Figure 8). Dans les deux cas, le système TELSITE, qui a bénéficié d'une rénovation partielle à la fin 2005, a parfaitement fonctionné. L'alerte automatique TELSITE a été correctement déclenchée à Mururoa et clairement diffusée localement. Parallèlement, le système a diffusé une alerte auprès du sismologue d'astreinte du LDG en Métropole. Grâce aux nouveaux moyens de communications, les signaux ont été transmis très rapidement au centre d'analyse de Bruyères-Le-Châtel où ils ont été analysés aussitôt par l'ingénieur d'astreinte sismique. Dans chaque cas, une télécopie de bilan rapide de situation a été envoyée au CEA/DAM, au DSCEN et au COMSUP dans l'heure suivant l'alerte. Une note de bilan détaillé a été diffusée par le DASE/LDG les jours suivants pour chacun des événements (réf.[ 36 ],[ 39 ]).

L'analyse des signaux, caractérisés par des débuts nets et des phases sismiques P et S identifiables (Figure 9), montre qu'il s'agit d'événements correspondants à des relâchements de contraintes et non à des éboulements. L'épicentre de l'événement du 12/01/2007 se situe dans un secteur externe à environ 500 m au nord de la station Française (implantée près du PK10.5), et forme un alignement de direction nord-est avec l'essai 2006, normal à la ligne de côte (Figure 8). La sismicité de cette zone est identifiée et suivie depuis de nombreuses années et coïncide avec la bordure ouest de la zone en mouvement « Française ».

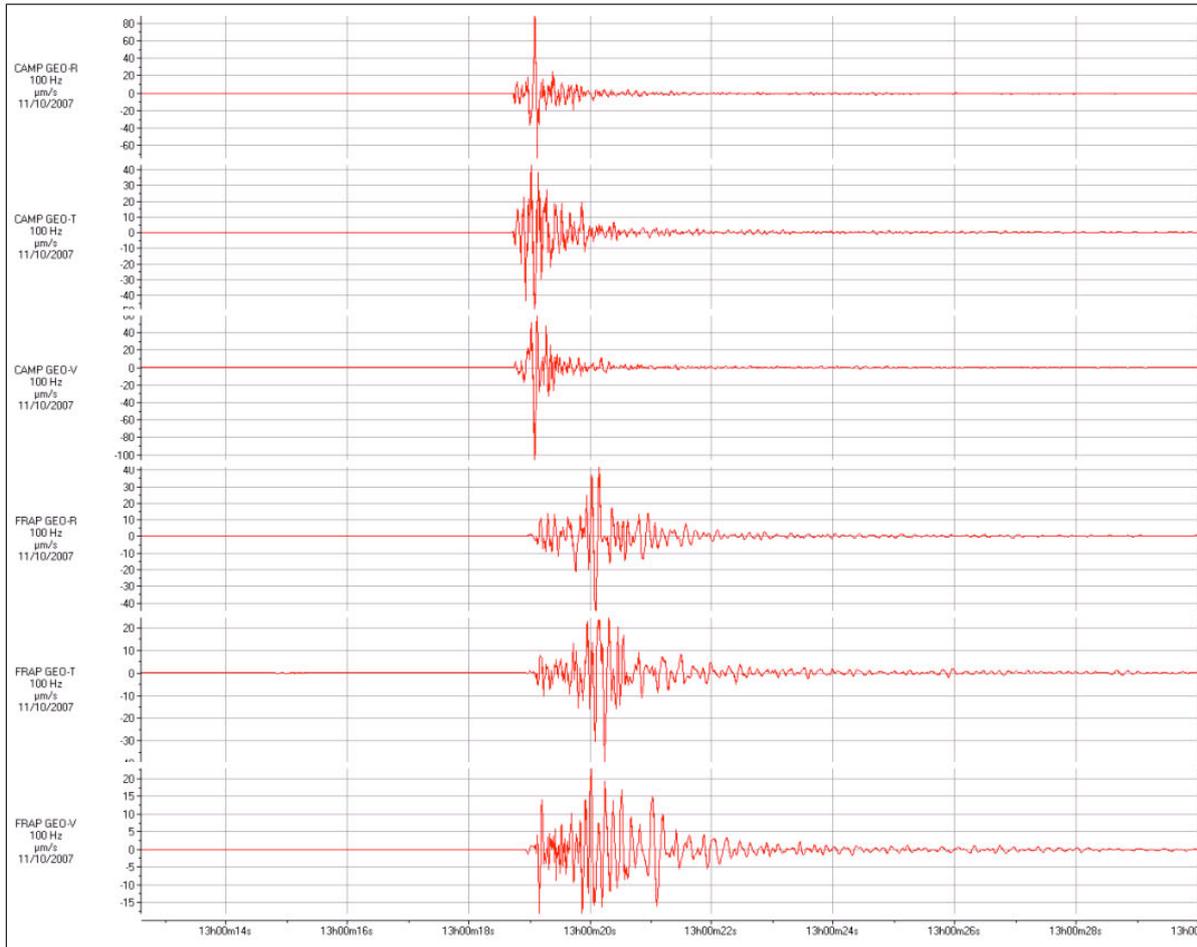
Ces deux événements correspondent à des magnitudes respectives de 1,4 (12/01/2007) et de 1,5 (11/10/2007). Les magnitudes des événements ordinairement observées se situent en moyenne entre -1,5 et 1 (Figure 10). L'événement du 12 janvier est précédé le 10 janvier d'une série de 5 petits relâchements de contrainte qui se produisent en quelques minutes. Depuis l'installation du système TELSITE, il s'agit du septième événement de magnitude supérieure ou égale à 1.4 à se produire en zone Française (Figure 10). Si les événements de la série fin 2006-2007 sont peu courants de par leur amplitude et leur caractère répétitif en une durée limitée, des événements de même ampleur ont donc déjà été observés dans la zone nord de l'atoll et les valeurs de magnitude restent dans la gamme microsismique. Ils ne présentent donc pas de caractère exceptionnel. Le second événement de l'année du 11/10/2007 se produit à la limite des deux zones en mouvement, Camélia et Française, l'un des autres secteurs de la zone nord où se concentre également une activité sismique. Ce relâchement de contrainte ne présente donc pas non plus de caractère inhabituel de par sa localisation, mais il s'agit en revanche du premier événement de cette magnitude enregistré dans ce secteur.



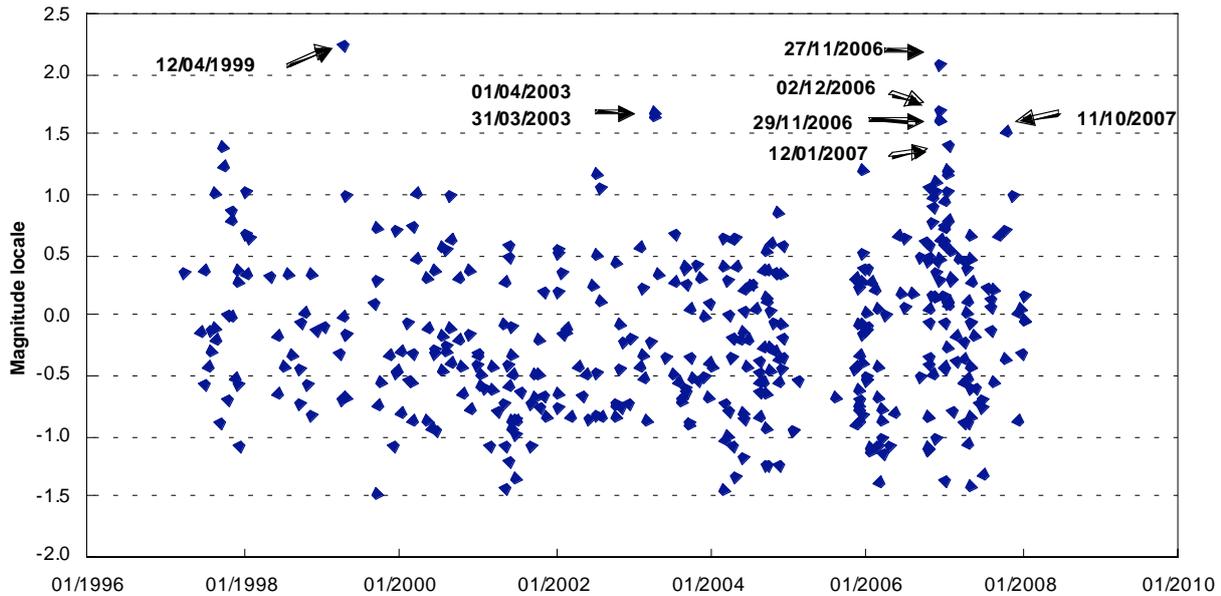
**Figure 8 :** Carte de la localisation des 2 alertes des 12 janvier et 11 octobre 2007 (étoiles) par rapport à la sismicité générale. Les cercles verts indiquent les localisations déterminées pour les 3 alertes s'étant produit fin 2006. Remarque : la localisation de l'événement du 11/10/2007 a été légèrement révisée par rapport à la note (réf.[ 36 ]).

### **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 de la zone en mouvement (Figure 8). Les événements sismiques observés dans cette zone confirment les caractéristiques cassantes de la bordure (de même pour les événements de la limite des zones Camélia-Française). Les données sismiques sont insuffisantes pour déduire les mécanismes précis à la source des événements. Pour les foyers externes au platier, les mécanismes possibles sont les suivants : les événements sont la manifestation des accumulations des contraintes qui s'exercent le long de la bordure ouest de la zone en mouvement et sont régulièrement relaxées, le miroir de faille serait alors dans une direction générale perpendiculaire à la ligne de côte et le mouvement correspondrait à un mécanisme de type cisaillement (avec composante normale) associé à un vecteur de glissement plutôt senestre, pour être globalement compatible avec un mouvement général de la zone vers le nord. Elles peuvent être aussi l'expression du rejeu ou de l'ouverture des failles bordières longitudinales externes, à diverses profondeurs. Le miroir de faille serait alors parallèle à la ligne de côte, le mécanisme type serait plutôt de type faille normale ou en mode ouverture si les foyers sont superficiels.



**Figure 9 :** Signaux sismiques correspondant à l'événement du 11/10/2007, localisé en limite des zones en mouvement Camélia et Française. Ces signaux sont caractéristiques d'un événement de type relâchement de contrainte.



**Figure 10 :** Magnitudes observées depuis l'installation du système TELSITE déduites des amplitudes automatiques de la base de données. Parmi les huit événements de magnitudes supérieures ou égales à 1.4 (flèches), les sept premiers se produisent en zone Française, celui du 11/10/2007 en zone Camélia.

#### ***Données issues des capteurs séquentiels lors des alertes***

Pour ce qui concerne la zone Française, durant la période ayant précédé ou suivi les événements à l'origine des alertes de fin 2006 et janvier 2007, les capteurs séquentiels n'indiquent aucun changement de tendance tant en surface (GPS) qu'en profondeur (FIL et inclinomètres). Toutefois, il convient de noter que l'un des 2 câbles inclinés, implanté à 45°, au PK10 proche de la zone Française, est maintenant bloqué depuis fin 2005, ce qu'il faut considérer comme une absence de mesures. Aucun mouvement particulier n'est détecté (Figure 12) en surface en zone Française par la station GPS Kilo, ce qui est compatible avec une localisation des événements au large de la zone côtière, dans la partie externe sous-marine de l'atoll, sans conséquences sur la couronne corallienne émergée. La zone Française est celle où le câble incliné à 45°, (FIL 10.45, ancré à 363 m en profondeur) enregistrait, avant son blocage fin 2005, les mouvements en profondeur les plus rapides de la zone nord. La vitesse de déplacement du câble était elle-même deux fois plus importante que celle du câble le moins profond (FIL 10.40 incliné à 40° à 288m de profondeur), ce qui signifiait que le mouvement des masses carbonatées était plus actif en profondeur qu'en surface, concernant par conséquent la partie externe de l'atoll (réf.[ 28 ]). Ces données en profondeur sont donc compatibles avec la localisation externe des événements de fin 2006-2007. Malgré l'absence de mesures provenant du FIL 10.45, compte tenu des informations fournies par l'ensemble des capteurs séquentiels, et notamment l'absence de mouvement détecté en surface, il a été considéré qu'il n'y avait pas lieu de modifier le niveau de risque.

Une procédure de surveillance accrue avait été mise en place en décembre 2006 et janvier 2007. Elle comprenait des contrôles plusieurs fois par jour, effectués par les ingénieurs d'astreinte, de l'évolution de la sismicité et des capteurs séquentiels. Le taux de sismicité étant revenu à des valeurs normales (environ 1 événement/semaine), cette procédure de surveillance accrue a été levée début février 2007.

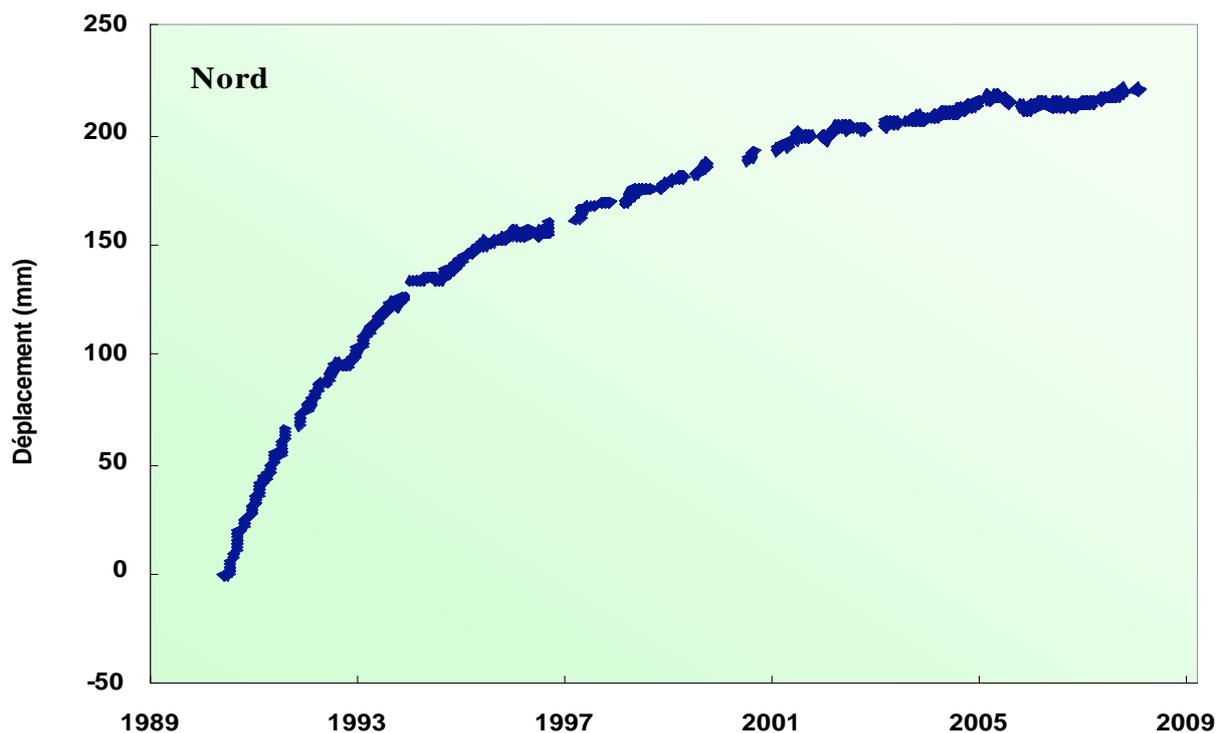
En zone Camélia, les mesures effectuées par la station GPS située sur la digue Charlie ont marqué une légère accélération vers le nord dans les quelques jours précédant l'alerte du 11 octobre, puis ont enregistré un léger pic de mouvement la veille de celle-ci. Ces mesures de surface rappellent que des mouvements vers l'océan affectent la couronne en zone Camélia dans son ensemble, de la surface en profondeur, et que des phénomènes de type basculement ou chutes de falaise peuvent se produire à tout moment.

**L'activité sismique en 2007 en zone nord-est de Mururoa est d'un niveau plus calme qu'en 2006 en nombre d'événements, notamment en zone Française. Deux événements déclenchent cependant l'alerte sismique, tous deux en bordure de zones en mouvement. L'un se produit en zone Française, faisant suite à la série des 3 événements de fin 2006. Le second événement est localisé à la limite des zones en mouvement Camélia-Française, où existe une activité sismique connue. C'est cependant le premier événement atteignant une magnitude de 1.4, observé dans ce secteur depuis l'installation du système Telsite.**

#### Déplacements et déformations en surface

Le déplacement horizontal mesuré en surface au centre de la zone en mouvement (Figure 11) s'effectue durant l'année 2007 à une vitesse moyenne de 0,5 mm/mois dans la direction nord. Le mouvement continue de s'effectuer dans une direction globalement nord/nord-ouest. Une petite variation, assez inhabituelle, apparaît de novembre 2004 à décembre 2005 mais n'affecte pas cette tendance. L'origine de cet écart est inconnue. Parmi les causes possibles, un effet très local comme un mouvement du pilier lui-même ou du bloc de béton qui le supporte n'est pas exclu. Une consolidation de la digue a été effectuée en 2006 par les armées (réf. [ 35 ]).

---



**Figure 11:** 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 1990 à 2007.

Le mouvement vertical est inférieur ou égal à 1mm/mois, ordre de grandeur de la vitesse habituellement observée.

Bien que l'évolution de la valeur moyenne dans les trois directions soit moins régulière depuis 2003, le mouvement est *globalement* en ralentissement sur ces dernières années. Les valeurs des vitesses pour ce capteur, calculées linéairement sur les intervalles correspondant aux deux dernières campagnes topographiques, indiquent un ralentissement moyen qui est globalement de 50 % sur la période 2001-2007 (environ 0,3 mm/mois), comparée à celle de 1996-2001, donc bien en deçà de la vitesse d'évolution précédant la campagne 1995-1996 qui était légèrement supérieure à 1 mm/mois dans la direction nord.

Les données des deux nouveaux 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 si ce n'est, pour la station ALPHA, un léger mouvement vers l'ouest. Pour la station ECHO, il n'est décelé aucun mouvement notable supérieur au bruit de fond si ce n'est un léger mouvement relatif vers le sud (< 1 mm/mois) les premiers mois de l'installation, d'octobre 2005 à août 2006. Les mesures des stations GPS confirment la stabilité du platier au niveau des extrémités est et ouest de la zone Camélia, au regard des parties plus externes de la couronne.

Les déplacements mesurés en 2007 par les stations GPS du système Telsite, de part et d'autre de cette zone centrale, au niveau des digues HOTEL, dans la zone Irène, et KILO, dans la zone Françoise,

restent également minimales. 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 confirment la stabilité du platier. La présence des stations de surface en continu est donc importante pour vérifier cette tendance.

**En revanche, en raison de leur position en deçà des fractures bordières immergées, les stations GPS et les piliers jalons ne reflètent pas, au niveau des zones Française et Irène, le mouvement des terrains en profondeur mesuré par les câbles en forages inclinés, respectivement les FIL 10.40 et 10.45 en zone Française, et FIL 5.30 et 5.45 en zone Irène.**

Les mesures de surface enregistrées par le système TELSITE indiquent une évolution globale cohérente avec les mesures topographiques classiques de la campagne quinquennale 2001 et, en première analyse, de la campagne 2007 pour la zone nord de Mururoa, en particulier en ce qui concerne le déplacement horizontal maximal (composante nord) mesuré au centre de la zone Camélia.

#### 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. [ 19 ]).

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

---

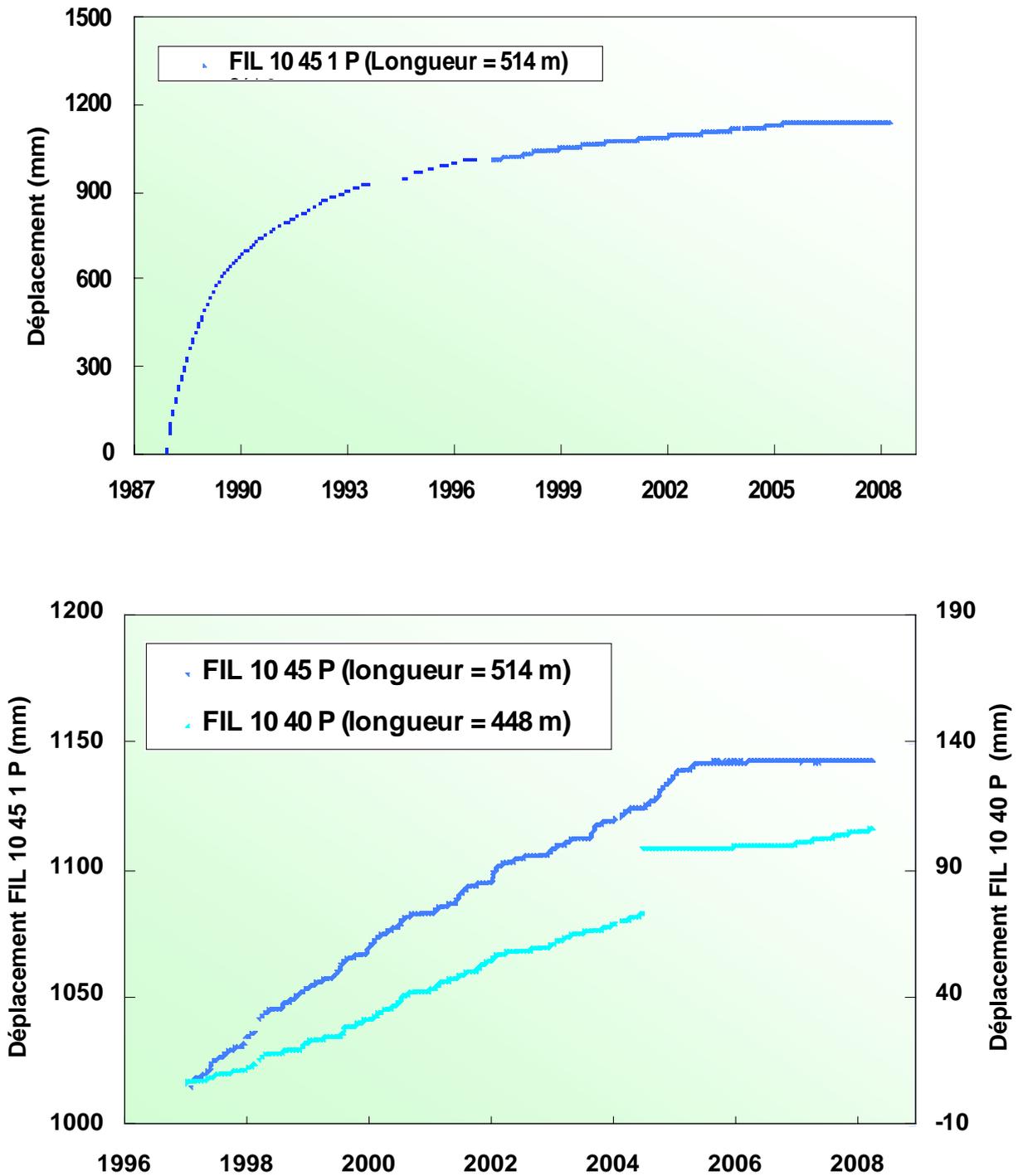
PK10 et PK5, les mouvements des FIL semblent évoluer avec des alternances régulières d'épisodes de blocage-déblocage, et paraissent, sur le moyen terme, représentatifs du mouvement attendu par des modèles d'évolution en cours d'élaboration.

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.

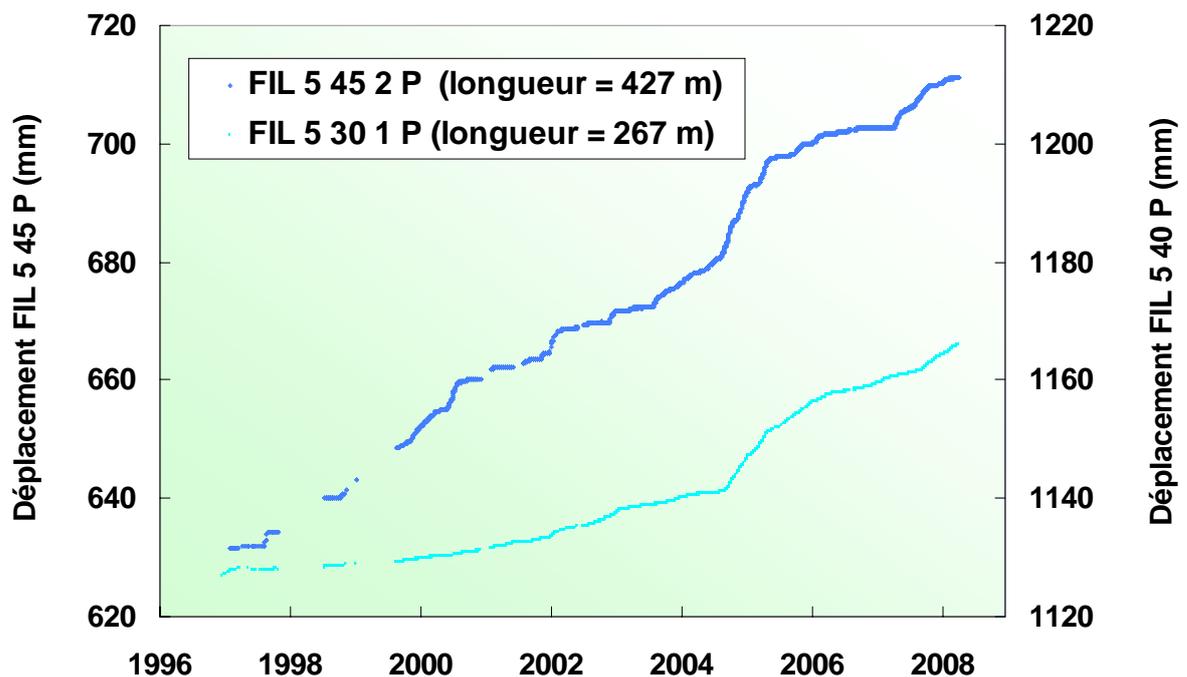
### ***Mesures dans les forages inclinés latéraux***

Le déplacement des formations de flanc (Figure 12) montre un ralentissement progressif depuis 1996, tendance représentative de l'ensemble des capteurs. Pour ce capteur, la vitesse était de l'ordre de 2 mm par mois en 1995-1996. Elle est inférieure à 1 mm/mois par la suite. Un épisode de légère accélération est observé de août 2004 à juin 2005 (réf. [ 22 ], [ 29 ]) puis le mouvement stagne brusquement. Cette stagnation se poursuit en 2007, ce qui signifie que le câble est sans doute toujours bloqué. Durant l'épisode d'accélération, la vitesse avait atteint des valeurs de 2-2,5 mm/mois, en limite des valeurs observées en période normale. Si pendant un certain temps, la stagnation peut être attribuée à une sorte de rattrapage après une accélération du mouvement, le blocage perdure. Il a été vérifié que le capteur fonctionnait correctement. Il faut donc considérer que le câble implanté dans le forage à 45° est bloqué et ne fournit plus de mesures. On ne dispose actuellement pas de moyens de suppléer à cette défaillance. Il n'est pas possible de dire si le câble pourra se débloquer ou si le dispositif est perdu. Les mesures du forage incliné à 40 degrés dans la zone Française, qui semblait bloqué depuis juin 2004 après un saut de 25 mm (dont la cause pourrait être un rattrapage après une période de blocage), a repris quant à lui un léger mouvement depuis fin 2006 (Figure 12, courbe bleue clair).



**Figure 12** : Déplacements mesurés par les câbles implantés dans les forages inclinés à 45 degrés (FIL 10 45, longueur de 514 m) et à 40 ° (FIL 10 40, longueur de 448 m) en zone Française, de 1996 à 2007 (en bas) et historique du déplacement depuis 1987 du FIL 10 45 (en haut).

En zone Irène, après un épisode d'accélération observé, comme pour le FIL 10.45, de août 2004 à mai 2005 (réf.[ 22 ],[ 29 ]) au cours duquel les vitesses avaient ponctuellement dépassé les valeurs normalement observées, les mouvements des deux câbles ancrés dans les forages inclinés à 45° et 30° s'étaient progressivement amortis. En 2007, les mesures montrent une légère reprise de l'accélération en avril pour le FIL 5.45 (ponctuellement < 2,6 mm/mois) et en septembre pour le FIL 5.30 (0,6 mm/mois). Les valeurs moyennes des vitesses sur l'année restent en deçà des valeurs critiques, mais sont significatives d'un mouvement toujours actif (Figure 13).



**Figure 13** : Déplacements mesurés par les câbles implantés dans les forages inclinés à 45° (courbe bleue : FIL5.45°, longueur 427 m) et à 30° (courbe bleu clair : FIL 5.30, longueur 267 m) en zone Irène.

Ces mesures montrent que la zone Irène peut être sujette à des mouvements de terrain imprévisibles. Ces déstabilisations pourraient avoir comme conséquence des effets hydrauliques. Aussi, des compléments d'étude pour des calculs plus spécifiques à ce secteur ont-ils été menés. Après une remise à niveau des logiciels et la réalisation de tests de validation en 2006 (réf.[ 37 ]), des calculs intégrant divers scénarios spécifiques de la zone Irène et leurs effets locaux ont été effectués (rapport préliminaire, (réf.[ 40 ])). Ils feront l'objet d'un rapport mi-2008. Les estimations des effets sur des atolls distants tels que Turéia seront poursuivis en 2008.

Les capteurs de la zone Camélia (FIL 8.30 et 8.40) ne montrent pas de changement de tendance. Ils restent à des vitesses très faibles (< 0.2 mm/mois).

**Mesures inclinométriques**

La déformation au sein des couches profondes mesurée par des inclinomètres scellés dans un puits à plusieurs centaines de mètres de profondeur au centre de la zone Camélia ne présente pas d'évolution notable en 2007. Les quelques variations visibles en 2003 pour deux capteurs (n°29 implanté à la base des dolomies à 350 m de profondeur et le n°22, implanté dans les calcaires crayeux à 451 m de profondeur) restent minimales (Figure 14, Figure 15). Les deux capteurs évoluaient vers le nord-est depuis fin 2003. Un léger changement d'évolution en orientation du capteur n°29 vers le sud-ouest depuis fin 2006 peut dénoter un léger découplage du mouvement des couches en profondeur. Pour rappel, le capteur de secours n°27 (profondeur 376 m) a été connecté en remplacement du capteur n°26, hors service depuis décembre 2004 ; la composante E-O de l'inclinomètre n°28 (implanté dans les calcaires crayeux à 365 m) est hors service depuis juin 2004.

**Synthèse de l'activité en zone nord-est**

La synthèse des mesures obtenues en zone nord-est en 2007 est présentée dans le tableau ci-après. Les quatre indicateurs restent associés à une évolution normale.

Indicateur	Valeur fin 2007	Valeur associée à une évolution normale après la période 1995-1996	Valeur associée à un changement d'évolution significatif
Sismicité : nombre de microséismes par semaine	$\leq 1$ /semaine sur l'année	< 1 /semaine	> 10 / semaine
Déplacements horizontaux et dans les forages inclinés	$\leq 1$ mm / mois	< 2 mm/mois	> 20 mm / mois
Déplacements verticaux	< 1 mm / mois	< 1 mm/mois	> 10 mm / mois
Inclinométrie	= 0,2 millidegrés / mois	< 0,2 mdeg/mois	Quelques millidegrés / mois

**Synthèse des mesures TELSITE obtenues en zone nord-est en 2007.**

Les valeurs actuelles (2ème colonne) sont comparées avec les valeurs observées après l'arrêt définitif des essais en 1995-1996 (3<sup>ème</sup> colonne), qui elles-mêmes correspondent aux valeurs associées à une évolution dite normale, qui avaient été observées dans les années précédant la reprise des essais.

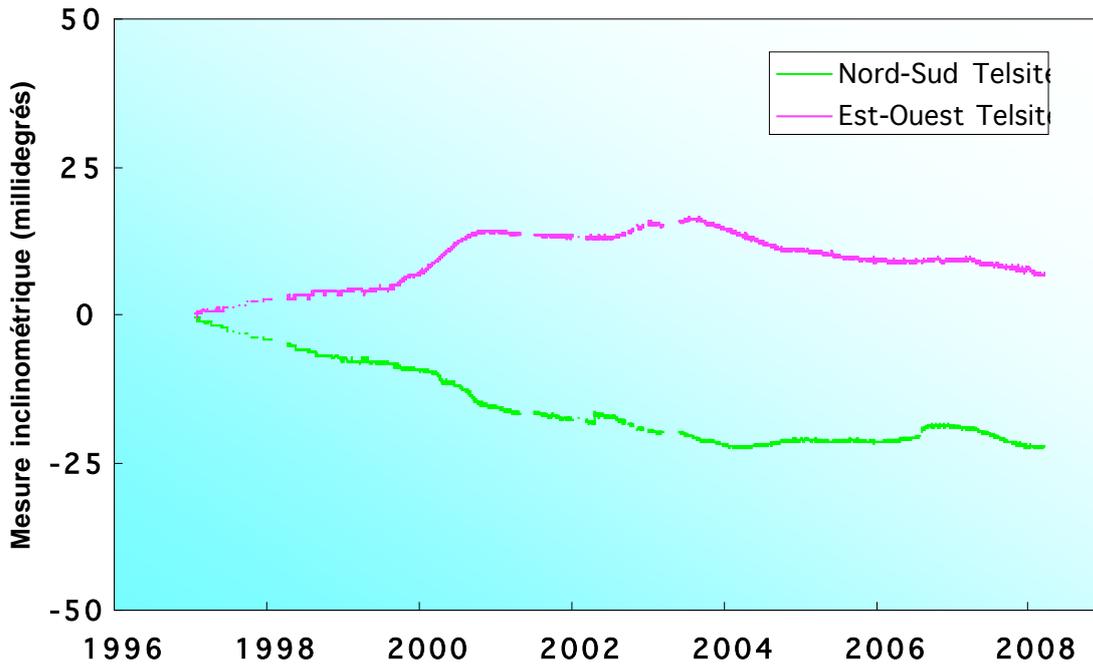
Les mesures sont cohérentes avec la prévision faite il y a quelques années d'un ralentissement progressif du mouvement.

**Après un épisode de légère accélération à partir d'août 2004, (2 FIL inclinés à 30° et 45° en zone PK5 nord, un FIL incliné à 45° en zone PK10 nord), un retour à des valeurs associées à une évolution normale ou stagnante des capteurs de déformation depuis mai 2005, se confirme en 2007. L'activité microsismique reste cependant toujours irrégulière depuis mi 2004, phénomène corroboré par 3 alertes sismiques survenues en fin d'année 2006 et 2 alertes en 2007.**

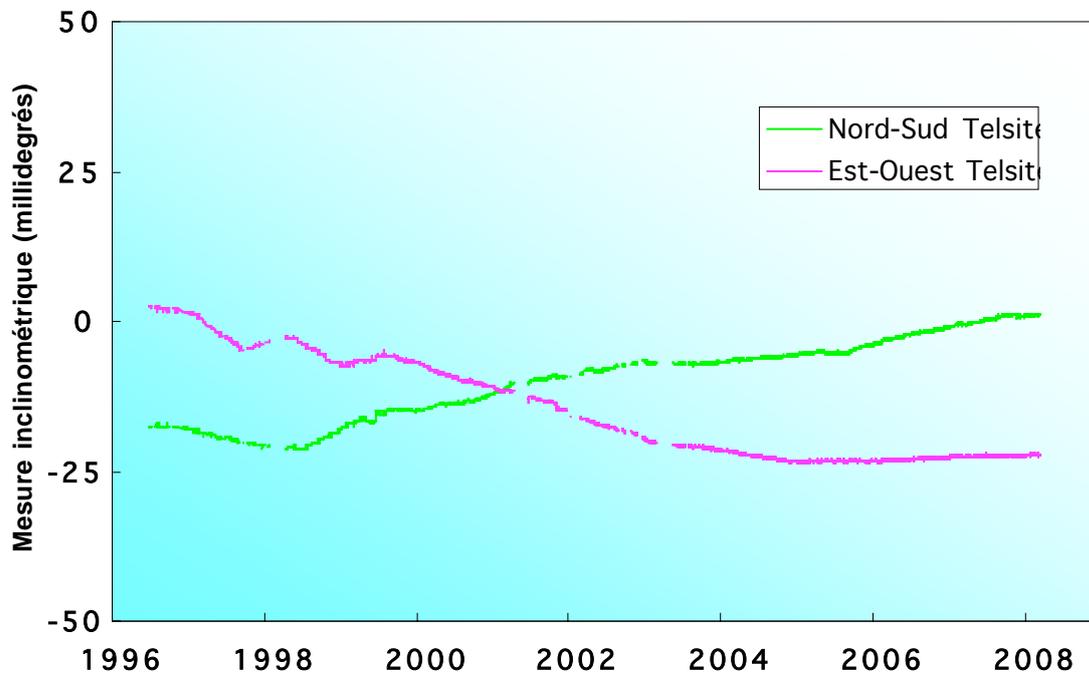
Ces mesures montrent que si le mouvement reste *globalement* cohérent avec les prévisions d'un ralentissement depuis la fin des essais, celui-ci reste néanmoins actif.

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

---



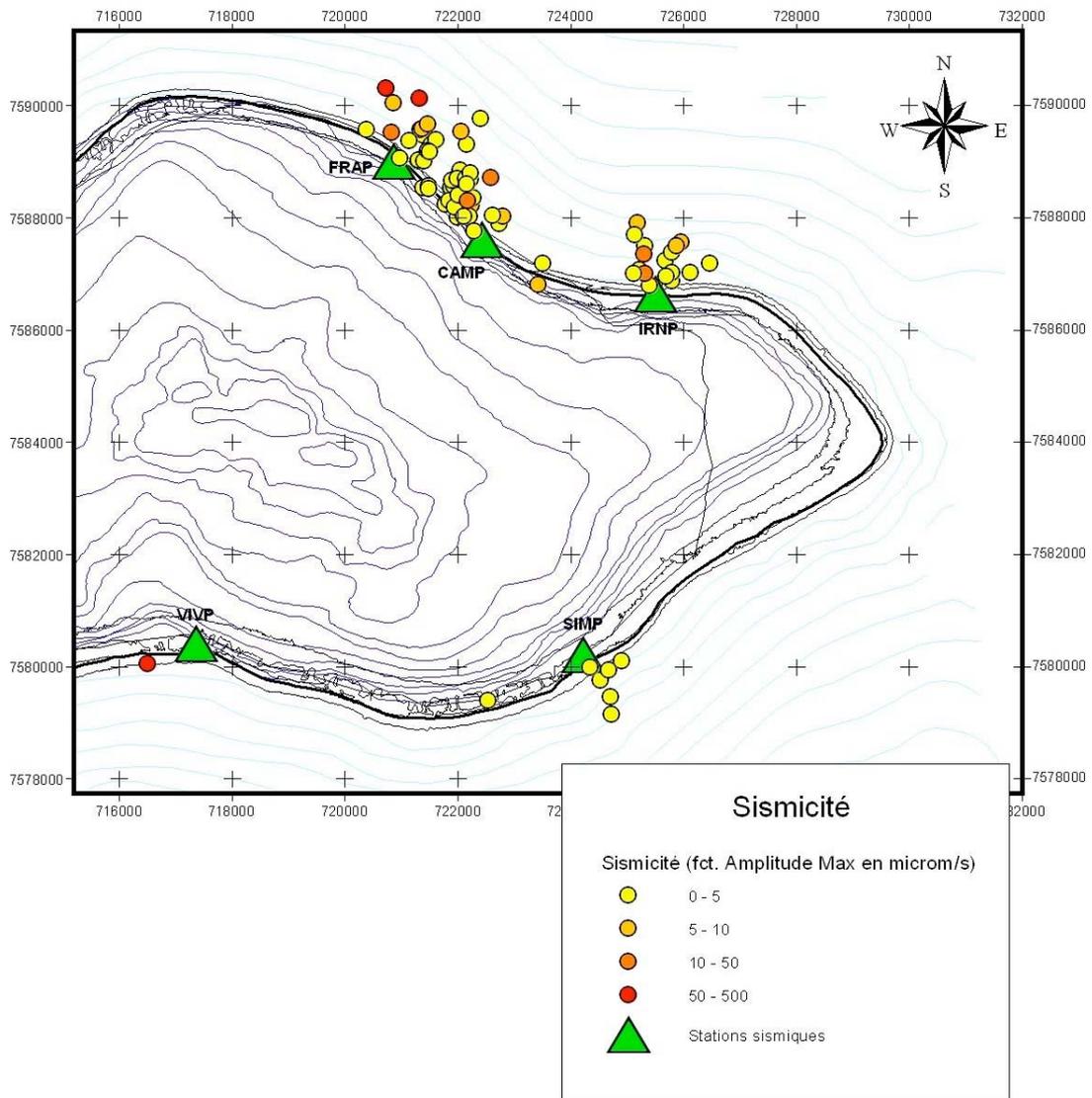
**Figure 14 :** Evolution du capteur inclinométrique du forage GEO8B (n° 29) en zone Camélia implanté dans les dolomies à 350 m de profondeur.



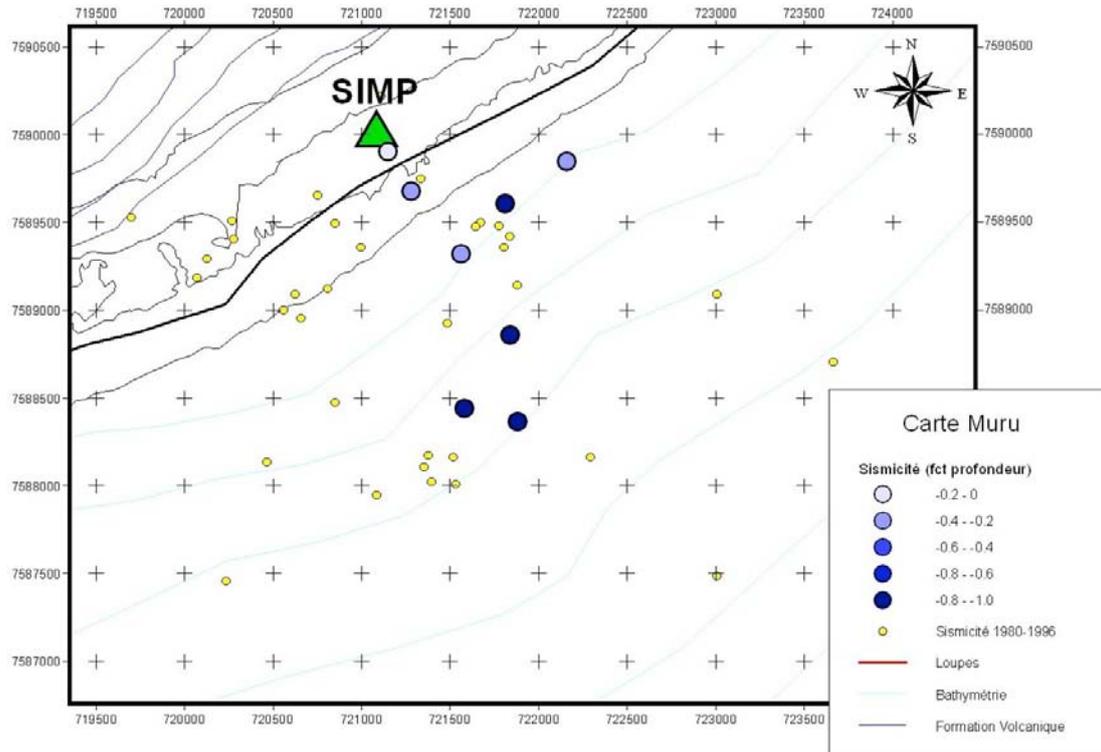
**Figure 15:** Evolution du capteur inclinométrique du forage GEO8B (n°22) en zone Camélia implanté dans les calcaires crayeux à 451 m de profondeur.

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

La Figure 16 donne un aperçu d'ensemble de la sismicité pour les événements localisés (sur les périodes 2000-2003 et de janvier à avril 2004) sur l'ensemble de l'atoll, représentés en fonction de l'amplitude maximale du signal sur la station la plus proche. On peut constater que les secteurs autres que la zone nord sont faiblement touchés par la sismicité et que celle-ci se manifeste dans les mêmes secteurs que pour les années antérieures, avec une légère activité en zone sud-est (Figure 16, Figure 17).



**Figure 16:** Carte de sismicité traitée dans les secteurs nord-est, sud-est et sud-ouest pour les années 2000, 2003 et de janvier à avril 2004, en fonction de l'amplitude maximale du signal sur la station la plus proche.

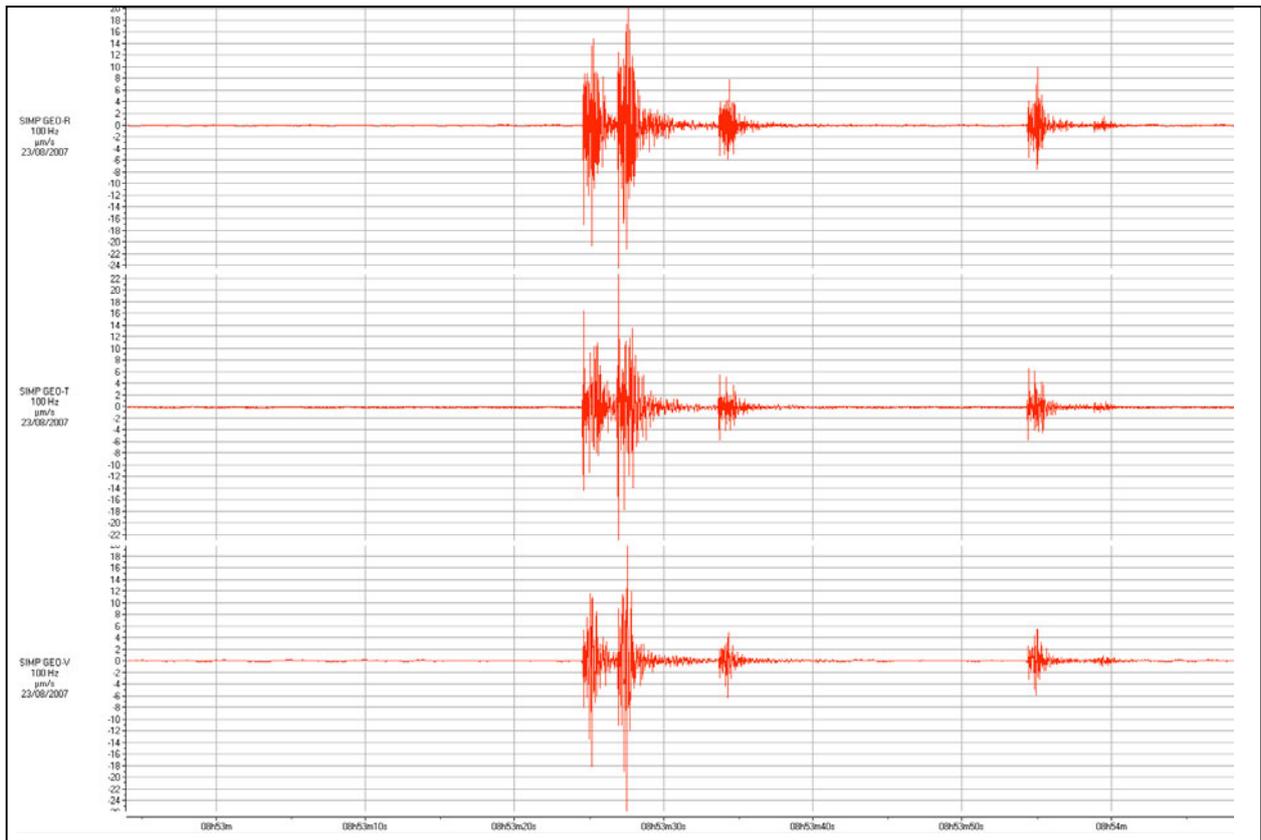


**Figure 17:** Evénements microsismiques en zone Simone qui ont fait l'objet d'une localisation, représentés en fonction de la profondeur. Dégradés de bleus : Année 2000, 2003 et de janvier à avril 2004 en bleu. Points jaunes : Années 1980-1996.

En 2007, 14 événements sismiques très faibles (magnitude < 1,5) ont été enregistrés en zone sud-est de l'atoll, en zone Simone, par la station GEO8S (Simone 8). La Figure 18 montre un exemple représentatif de signaux de relâchements de contrainte enregistrés par cette station. Après une légère augmentation de l'activité sismique observée en 2006, le nombre de microséismes enregistrés dans cette zone en 2007 retombe à un niveau proche des années antérieures (nombre d'événements < 10) mais reste de niveau faible en magnitude.

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 18** : Exemples de signaux d'une série de quatre relâchements de contrainte observés par la station Simone située en zone sud-est de Mururoa, le 23 août 2007.

### ***Etude de l'Evolution Géologique***

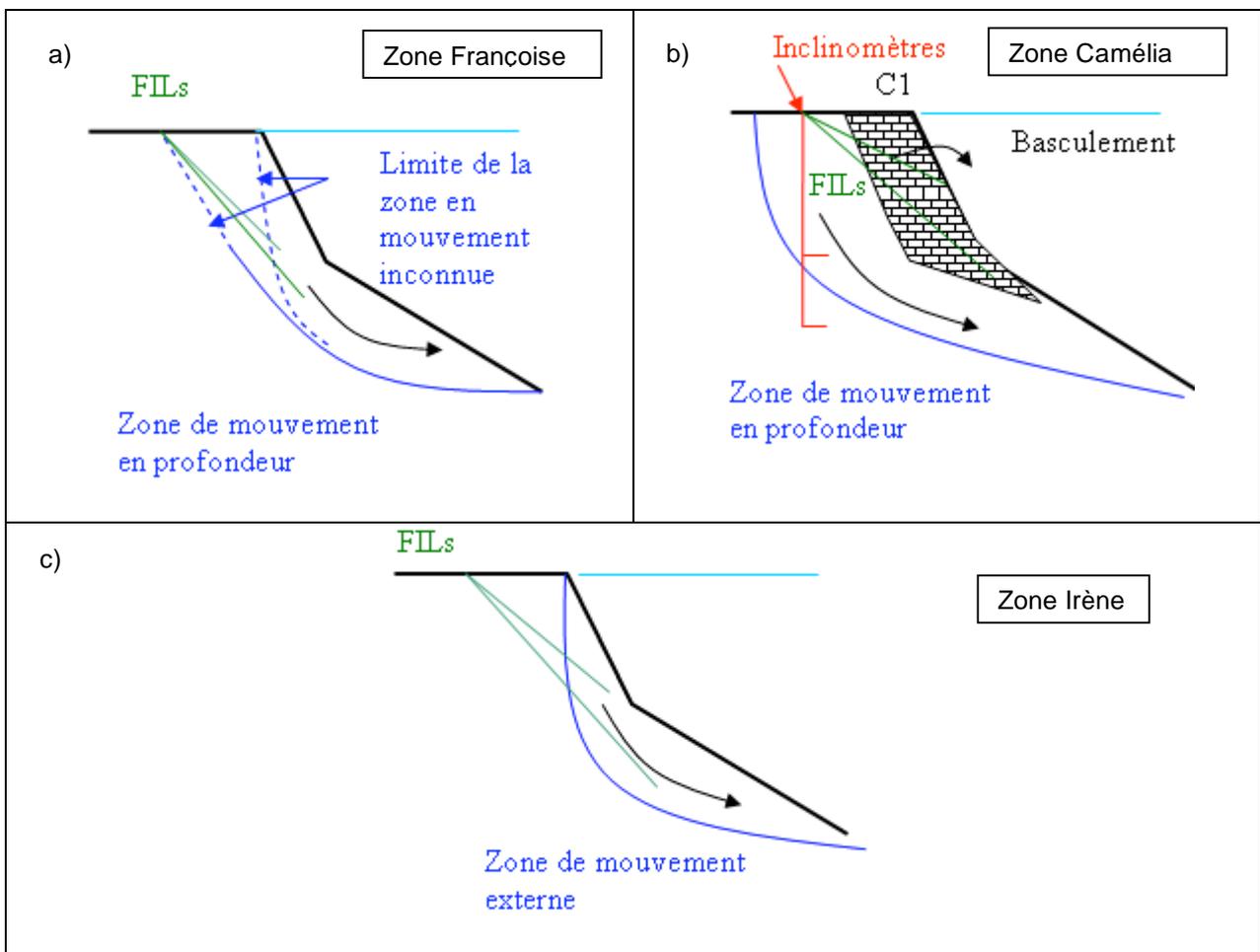
Une étude de l'évolution géomécanique de l'atoll, avec pour objectif l'évaluation de l'évolution et de la surveillance adaptée, a été menée et s'est achevée en juin 2006. Elle a consisté en l'interprétation croisée de l'ensemble des données disponibles et la confrontation avec des modèles classiques de fluage ainsi qu'avec le type de lois rhéologiques compatibles avec les sollicitations connues (réf. [ 28 ]).

Les principales conclusions de cette étude sont les suivantes :

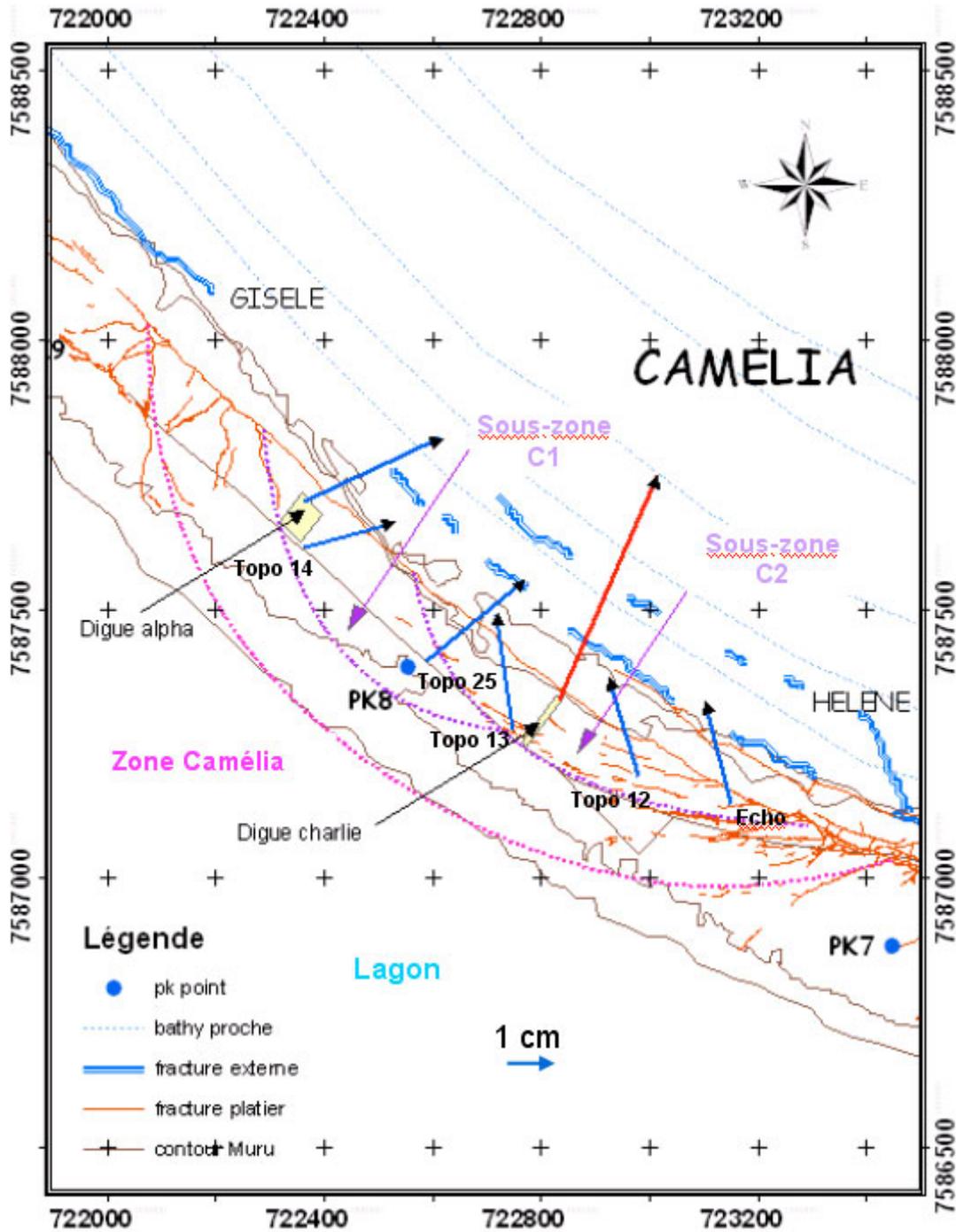
- Un amortissement global du mouvement dans les trois zones de la partie nord de l'atoll est confirmé depuis la fin des essais. Du fait de la persistance d'un mouvement lent en profondeur et de quelques irrégularités récentes dans l'évolution, la surveillance du site nécessite le maintien en place de tous les capteurs.
- Les trois zones présentent des mouvements lents, différentiels, en profondeur (Figure 19 a, b, c). Les mouvements les plus rapides sont observés dans la zone Françoise, mais c'est en zone Camélia, zone très fracturée, que les mouvements sont, en surface, les plus importants (Figure 19 b, Figure 20) 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 19 c).
- Des simulations numériques ont été réalisées pour rendre compte du déplacement des couches tendres en profondeur à l'aide d'une loi de frottement de Dieterich-Ruina calées sur 16 ans, équivalent à un mouvement de type fluage. On dispose dorénavant d'un modèle permettant la comparaison de l'évolution des capteurs avec celle attendue. Ce modèle confirme un léger écart à la tendance attendue pour le FIL à 45° en zone Irène sur la période fin 2004-mai 2005.



**Figure 19 :** Mécanisme de déformation des zones en mouvement Françoise (a), Camélia (b), Irène (c).



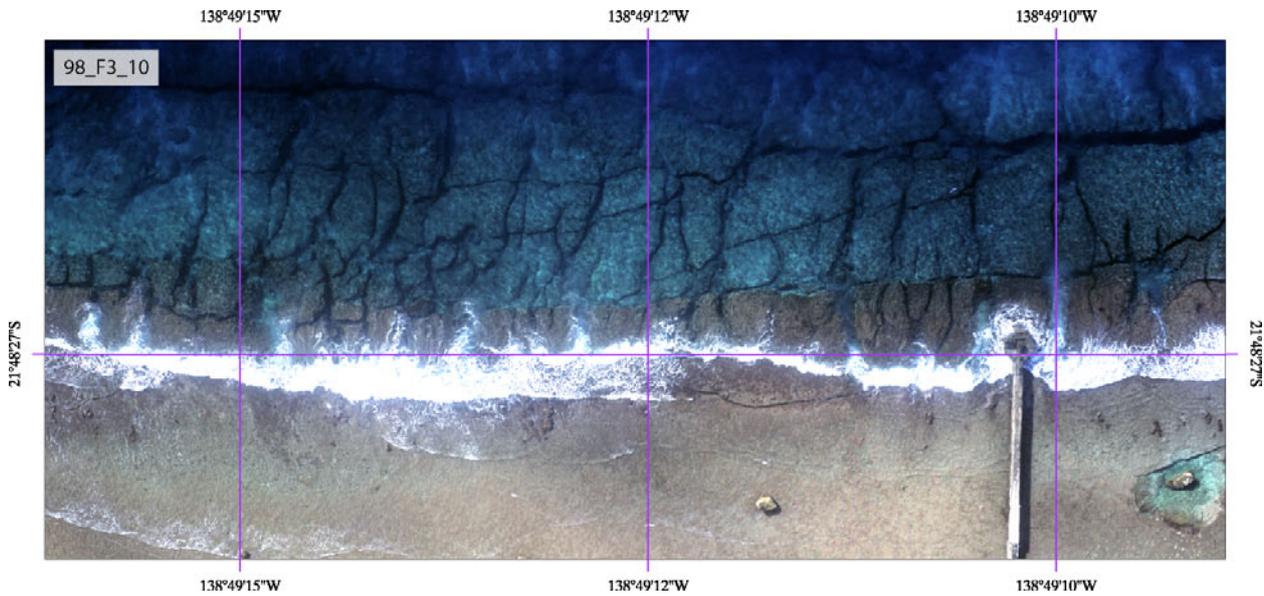
**Figure 20 :** Résultats de l'analyse géomécanique (réf. [ 28 ]) : déplacements horizontaux mesurés en surface superposés avec la carte de fracturation observée dans la zone Camélia. Les fractures observées sur le platier sont en rouge, la faille longitudinale continue est la faille F1. Les failles sous-marines (bordières) sont en double trait bleu, les digues sont en jaune, et les limites de zones sont en tirets (violet = sous-zones C1 et C2; rose = zone Camélia). Les flèches bleues indiquent les directions et amplitudes (facteur d'échelle de 10000) des déplacements mesurés entre les deux campagnes topographiques de 1996 et 2001. La flèche rouge correspond au déplacement le plus important mesuré. Deux groupes de direction suggèrent l'existence de deux sous-zones C1 et C2.

### **Apport de l'imagerie optique et satellitaire**

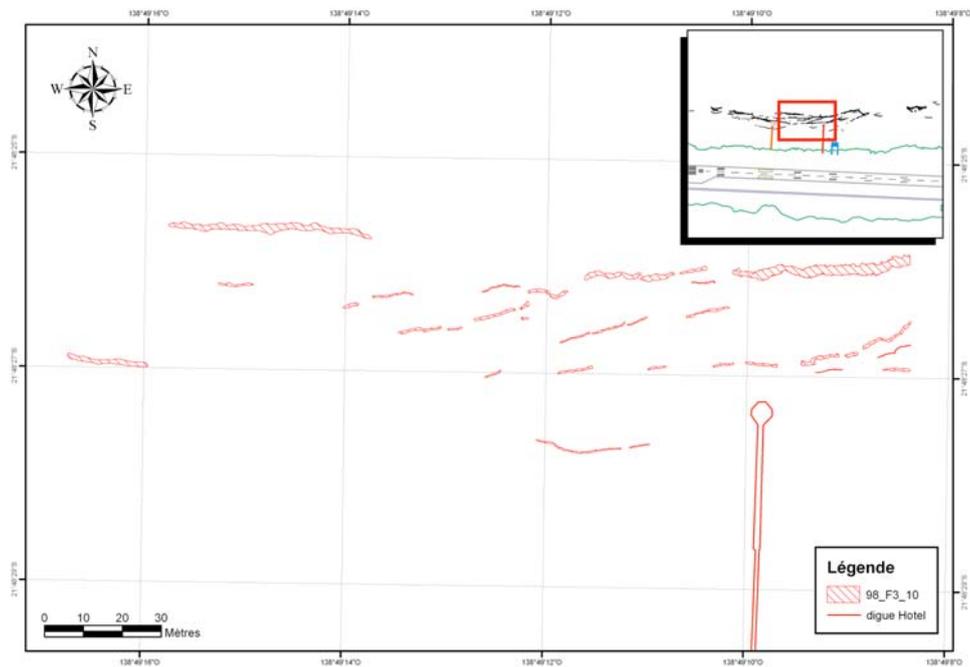
Etant donné les moyens importants nécessaires à mettre en œuvre environ tous les 5 ans pour le suivi de l'évolution du site de manière plus globale, une étude de faisabilité a été conduite en 2006 pour évaluer l'apport respectif des techniques d'imagerie optique et satellitaire à la surveillance de l'atoll (réf.[ 31]). Un autre intérêt était d'explorer le potentiel de ces techniques pour surveiller des zones inaccessibles des atolls de Mururoa ou Fangataufa, ainsi que de permettre notamment l'observation de la fracturation sous-marine. Cette étude comprend plusieurs volets explorant le potentiel des diverses techniques, imagerie aéroportée, imagerie radar (SAR à partir d'images du satellite ENVISAT) et satellites Très Haute Résolution de dernière génération. La cartographie numérique de la fracturation a été effectuée sur l'ensemble de la zone Irène (Figure 21, Figure 22) (environs du PK5), complétée par des analyses sur quelques segments des zones Camélia et Française. L'évolution de la fracturation a été comparée entre différentes dates disponibles (1980, 1983, 1987, 1988, 1993, 1998).

Les principales conclusions de cette étude sont les suivantes :

- L'imagerie fine aéroportée permet de cartographier les fractures bordières et de quantifier leur vitesse d'ouverture avec une précision centimétrique. La vitesse d'ouverture des fractures sous-marines a, comme pour les autres mesures, ralenti depuis la fin des essais en zone Irène et zone Camélia, jusqu'à la période étudiée en 1998.
- En zone Irène, il est noté que les courbes de déplacement des câbles inclinés, en profondeur, et celle de l'ouverture de la portion de failles bordières situées à l'aplomb, en surface, montrent une évolution similaire sur la période de données communes (1984-1998). Les valeurs cumulées de leurs déplacements respectifs sont, de plus, très proches (respectivement de 1117 mm et 1170 mm). Ainsi les valeurs d'ouverture des fractures en surface, pourraient donner un reflet de l'évolution des déplacements en profondeur, et fournir, de manière occasionnelle, des indications en cas de perte des câbles. C'est pourquoi, il serait intéressant d'exploiter des photographies aériennes récentes afin de confirmer l'existence de cette corrélation jusqu'à la période actuelle mais on ne dispose pas d'images exploitables postérieures à 1998. Il serait également intéressant de compléter l'étude dans les zones Camélia et Française.
- Les difficultés actuelles d'acquisition d'images en vue de l'étude de la fracturation conduisent à suggérer l'utilisation d'un appareil léger de type drone.
- Des images acquises par satellites Très Haute Résolution permettent d'apporter des éléments qualitatifs pour la détection de nouvelles failles ou leur évolution.
- La faisabilité d'un suivi des déformations de l'atoll à l'aide de réflecteurs artificiels (trièdres métalliques) permettant une télémétrie radar, est à l'étude. Ce dispositif, totalement passif, pourrait offrir une alternative pour la mesure de points complémentaires au système Telsite, en l'absence de mesures topographiques, du moins pour les mouvements verticaux.



**Figure 21** : Exemple d'image aérienne étudiée (acquise en 1998) d'une portion de la zone Irène (98\_F3\_10).



**Figure 22** : Cartographie de la fracturation réalisée à partir de l'image aéroportée de la Figure 21.

## ***Campagne topographique quinquennale de mesures complémentaires***

### Rappel du contexte

Dans le cadre des campagnes de relevés spécifiques à une échelle plus globale que celle fournie par le réseau Telsite, le fait marquant de l'année 2007 a été la réalisation d'une campagne topographique de mesures complémentaires de surface à Mururoa et Fangataufa fin 2007. La précédente campagne avait eu lieu en 2001. Elle s'est déroulée du 15 octobre au 17 novembre 2007 à Mururoa, et du 18 novembre au 1er décembre 2007 à Fangataufa. La préparation de cette campagne a pris en compte le retour d'expérience de la campagne 2001 (réf. [ 6 ]), en particulier l'anticipation des élagages, mais également l'indisponibilité de l'équipe (CEA/DAM/DPII) qui détenait jusque là expérience et parfaite connaissance du terrain et des traitements spécifiques des mesures (départs à la retraite, mutations). Pour la première fois, il a donc été fait appel à une sous-traitance extérieure, avec les risques éventuels induits par les différences possibles dans les méthodes utilisées.

Un cahier des charges a été rédigé (réf. [ 26 ]) et un appel d'offre a été lancé vers 5 sociétés fin avril 2006. La société SETIS a été retenue. Le programme de mesure demandé a été celui décrit dans le guide de surveillance, consistant en des relevés planimétriques, de nivellement, relevés par GPS et relevé de fracturation. Concernant les mesures par GPS, un levé des piliers topographiques de l'ensemble des polygonales secondaires à Mururoa, Kathie-Jeanne, Jeanne-Gisèle et Gisèle-Françoise a été réalisé, ce qui n'avait pu être fait lors de la dernière campagne.

Afin d'anticiper des problèmes éventuels, une mission de reconnaissance de quelques jours, en présence d'un ancien expert topographe, avait été organisée au préalable au mois de juin 2007. La mission d'octobre–novembre a bénéficié d'un important travail de préparation du terrain effectué par le détachement du RIMap et du soutien logistique tout au long de la mission. Principal gros œuvre, l'ensemble des travaux d'élagages a pu, à Mururoa, être entièrement réalisé par le RIMap avant la mission, ce qui a considérablement facilité la tâche des topographes. Les surfaces des piliers devant supporter les appareils topographiques avaient également été nettoyés, l'ensemble des repères de nivellement, encore en état, dégagés. A Fangataufa, le RR REVI de la Marine Nationale a apporté le soutien logistique ainsi que les moyens nautiques nécessaires pour l'accès aux zones de travail. Les élagages ont été réalisés par le RIMap pendant la mission.

L'ensemble du programme prévu a pu être mené à bien. Le rapport définitif a été remis par SETIS le 25 mars 2008 (réf.[ 41 ]). Les résultats feront l'objet d'un rapport détaillé d'interprétation CEA en septembre 2008. Des grandes lignes qui se dégagent des résultats, en première analyse, sont donnés ci-dessous.

### Premiers éléments d'analyse des résultats

Une première analyse des résultats issus du rapport SETIS permet de confirmer, à l'exception de deux points situés en zone Camélia, la poursuite d'un ralentissement général de la vitesse des déplacements en zone nord de Mururoa sur la période 2001-2007 par rapport à la période 1996-2001, tant en planimétrie (mouvements horizontaux) qu'en nivellement (mouvements verticaux), (Figure 3, Figure 23). Pour ce qui concerne les mouvements horizontaux et verticaux, les plus importants d'entre eux sont toujours localisés au centre de la zone Camélia. Pour les plus importants des mouvements horizontaux, ceux-ci sont enregistrés sur la partie émergée par les piliers TOPO14 et TOPO25, proche du PK8, et les piliers jalons des digues BRAVO et CHARLIE-DELTA (soit 4 cm de déplacement entre 2001 et 2007). Les vitesses horizontales les plus fortes calculées sur 6 ans sont donc de l'ordre de 0,7 cm/an, contre 1 cm/an sur la période 1996-2001, soit en diminution de 30% pour ce qui concerne la digue Charlie-Delta, tandis qu'un quasi arrêt du mouvement vertical est constaté pour les digues de India à Golf.

Concernant les résultats de nivellement, le long de la route en zone nord, le ralentissement est globalement de 50% par rapport à la période 1996-2001. Le déplacement vertical est toujours maximal au niveau du même point au PK8 (2,4 cm en 6 ans).

En zone sud, le déplacement vertical maximum atteint est de 0,9 cm sur 6 ans. En revanche, les mesures ne montrent pas de ralentissement entre les deux périodes mais les vitesses restent très faibles (< 1,5 mm/an).

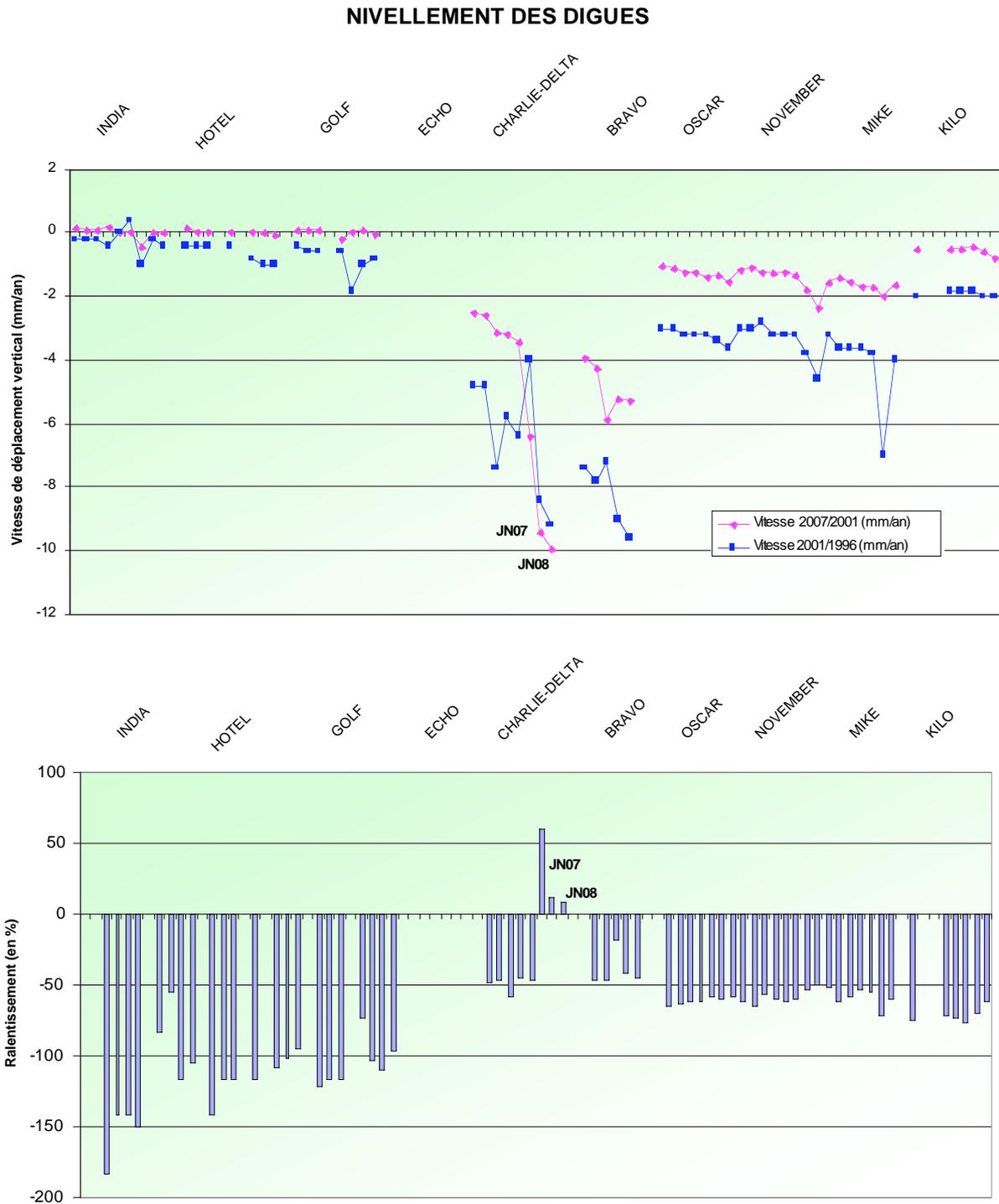
L'un des résultats notables de cette campagne concerne les résultats de nivellement sur les digues. En effet, les mesures montrent un ralentissement général, à l'exception de trois points, situés en zone Camélia où les évolutions du mouvement vertical restent du même ordre que sur la période 2001-1996. Pour les autres points, le ralentissement observé est compris entre 50 à 70%. Concernant les trois repères faisant exception, il s'agit des points intitulés DN41, JN07 et JN08, situés à l'extrémité de la digue Charlie-Delta, dont le mouvement montre, pour les deux derniers, un enfoncement de l'ordre de 1 cm/an, soit en légère augmentation (8 à 12 %) par rapport à la période 2001-1996 (Figure 23). Par ailleurs, l'évolution des points de la digue situés à proximité de la station continue GPS du système Telsite, est compatible avec les mesures de cette dernière, située un peu en deçà de ces points et des fractures bordières. Cette évolution confirme que le centre de la zone Camélia est toujours sensible. Ce secteur, très fracturé, est susceptible de donner lieu à des mouvements de type chute de falaise ou éboulement, imprévisibles, qui peuvent être superficiels, mais un phénomène de plus grande ampleur ne peut être exclu.

Ces tendances, en données relatives, confortent donc les prévisions sur l'évolution de la zone nord. Quelques légères modifications d'orientation dans les vecteurs de déplacement sont cependant notées en zone Camélia et seront discutées à travers une analyse plus fine dans le rapport final.

A Fangataufa, il n'est pas détecté d'évolution significative en dehors de la précision des mesures.

Excepté en quelques points très localisés, les résultats de la campagne topographique confortent, en première interprétation, les prévisions d'un ralentissement global progressif en zone nord. Cependant, il convient de noter que ce ralentissement observé en surface ne s'accompagne pas d'un même ralentissement de la sismicité qui se maintient au même niveau qu'après la période 1995-1996. Cela pourrait s'interpréter comme la subsistance de mouvements, en profondeur, de la partie externe des flancs, toujours actifs, non mesurables en surface ou par les capteurs en profondeur, qui n'atteindraient pas les couches concernées.

---



**Figure 23 :** Résultats de nivellement des digues de la campagne 2007. Comparaison des évolutions des vitesses de déplacements verticaux des repères situés sur les digues entre les périodes 1996-2001 et 2001-2007 (en haut) montrant un ralentissement général de 50 à 70% (en bas) pour la zone située entre les digues Charlie-Delta et Kilo, excepté en trois points (DN41, JN07, JN08) situés aux extrémités de la digue Charlie-Delta. La zone située entre les digues India et Echo ne montre pratiquement plus de mouvement vertical.

### **Compléments de calculs des effets hydrauliques en zone Irène**

La dernière utilisation des codes de calculs d'effets hydrauliques remontant à 1998, une remise à niveau des codes est apparue nécessaire et a été débutée en 2006. Des compléments de calculs par rapport à l'existant, ont été réalisés en 2007 (réf.[ 40 ]) et sont poursuivis en 2008. Il s'agit d'estimer les effets prévisionnels consécutifs à des glissements de terrain en zone nord-est, aussi bien vis-à-vis de la zone proche de la source, que les effets hypothétiques sur des rivages distants (atoll de Turéia, situé au nord de Mururoa). Suite à l'épisode d'accélération des vitesses observé fin 2004 notamment en zone Irène, les calculs ont porté sur la simulation d'effets prévisionnels hydrauliques consécutifs à des glissements de terrain dans cette zone, scénario pour lequel on ne dispose que de calculs très peu documentés. Les calculs intègrent quatre hypothèses de scénarios envisageant des volumes de déstabilisation de 6 à 340 m<sup>3</sup>, tout en discutant la sensibilité aux paramètres physiques. Le calage de ces outils sur les observations de l'événement consécutif à la vague Tydée de 1979 (pour lesquels on dispose d'observations en zone proche et à 30 km de distance) a été effectué au préalable, dans un premier temps pour ce qui concerne les effets locaux [ 37 ], avant de passer aux simulations de détails en zone nord-est (rapport préliminaire, réf.[ 40 ]). Cette première étude fera l'objet d'un rapport mi-2008. Elle comprendra le calcul des effets locaux pour la zone PK5 ainsi que les aspects méthodologiques pour la prise en compte par la suite du calcul sur les atolls distants.

### **Bilan de fonctionnement du système et des fonctions d'alerte ; actions correctives**

La fonction de génération d'alerte du système Telsite et sa diffusion sur site a été assurée toute l'année 2007 sans défaillance.

- 97% des données sismiques et des marégraphes ont pu être récupérées dont 97% en quasi temps réel et sauvegardées.
- 100% des données des capteurs FIL et Inclinomètres en état ont été récupérées.
- 98 % des données des stations GPS ont été récupérées à part pour la station GPS1 dont le taux de fonctionnement a été limité à 65% suite à une défaillance de la liaison radio en début d'année, puis à des câbles abîmés par la houle en fin d'année.

Les fonctions de surveillance ont pu être assurées malgré des dysfonctionnements rencontrés pour les systèmes de transmission nominaux par satellite VSAT, et de secours, par le système Inmarsat, entre le site (Mururoa) et les bases arrière du LDG Pamatai (Tahiti) et du DASE à Bruyères Le Châtel.

Les 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 95 jours dont 73 sont imputables à l'OPT. Les délais d'identification et de correction des problèmes survenant sur la ligne louée par l'opérateur sont très longs. Des interventions auprès des responsables commerciaux sont menées dans l'espoir d'améliorer la disponibilité de cette liaison. Les 22 autres jours d'indisponibilité de la transmission sont imputables à un sous-dimensionnement de la centrale solaire

alimentant le terminal VSAT sur Mururoa, suite à l'ajout par l'OPT d'un amplificateur HF sur ce terminal ayant provoqué une surconsommation de 60%. Un renforcement de cette centrale solaire a eu lieu fin avril 2008.

Les raisons de blocage du terminal Inmarsat M4 de la transmission de secours n'ont pas été identifiées malgré les tests menés de Bruyères-Le-Châtel conjointement avec la société TDCOM, exploitant du système. Néanmoins, les améliorations du système de réinitialisation à distance de l'équipement ont permis une meilleure disponibilité de ce système de secours. Des tests de remplacement du terminal dédié à des applications terrestres, actuellement utilisé, par un terminal destiné à des utilisations en milieu maritime, sans doute plus adapté étant donné la localisation du site sont en cours.

Actions correctives sur site : 16 hj

Compte tenu de la bonne stabilité du système d'alerte sur site, peu d'interventions correctives ont été nécessaires en 2007.

- Les principales actions ont porté sur la remise en état de la station GPS1 située en bout de la digue Charlie, fragilisée et très sollicitée par les vagues, sur laquelle les interventions sont difficiles.
- Les tests et la fiabilisation de la liaison de secours Inmarsat M4 par l'ajout d'un système de réinitialisation à distance constituent la deuxième cause d'intervention corrective sur site.

Actions de maintenance préventive : 32 hj

La mission de maintenance préventive a eu lieu en février 2007. En complément des actions de maintenance annuelle classique, un boîtier de brassage a été installé à cette occasion au niveau de la station Française, afin de pouvoir reconstituer un géophone trois composantes en cas de défaillance d'une voie du géophone titulaire, à partir des voies du géophone de secours.

Le nombre de jours d'interdiction d'accès en zone a été limité à 13 cette année contre 52 en 2006. Il est à noter que ces jours de restriction d'accès en zone ont été motivés par une perte de la surveillance à distance du système et non par son indisponibilité.

---

## **CONCLUSION POUR LE BILAN GEOMECANIQUE 2007**

Les mesures effectuées par les capteurs de déplacement situés en surface et en profondeur montrent que le ralentissement observé par les capteurs continus du système Telsite dans la zone nord-est de Mururoa se poursuit en 2007. Il est *globalement* conforme aux prévisions.

La campagne périodique de mesures topographiques complémentaires sur les atolls de Mururoa et de Fangataufa s'est déroulée en octobre-novembre 2007. En première analyse, les mesures de nivellement montrent une tendance au ralentissement en zone nord, d'une valeur globale d'environ 50%, à l'exception de deux points situés à l'extrémité de la digue Charlie-Delta, au centre de la zone en mouvement Camélia. Les mesures de planimétrie montrent une diminution des vitesses d'évolution de 30% pour les mouvements horizontaux les plus importants mesurés pour les points les plus externes au platier situés au centre de la zone Camélia. Le mouvement, dans son ensemble, bien que très lent, reste néanmoins actif. La sismicité, cependant, demeure au même niveau qu'après la fin des essais.

En zone sud, les mesures de nivellement effectué lors de la campagne topographique ne montrent pas de ralentissement, mais les vitesses restent très faibles.

Deux événements de type relâchements de contrainte ont déclenché l'alerte, l'un au mois de janvier en zone Françoise dans le partie externe, (faisant suite à trois événements qui avaient également déclenché l'alerte dans cette même zone fin 2006), le second, au mois d'octobre en zone Camélia, ce dernier étant plus inhabituel par sa magnitude pour la zone considérée. Le décalage entre le ralentissement observé en surface, et l'activité sismique, justifie un maintien de la vigilance au niveau actuel.

Concernant la compréhension du comportement géomécanique, les mesures confirment que les mouvements en profondeur continuent de se manifester dans les trois zones. Leur mouvement respectif, bien que lents, évolue à différentes vitesses, entraînant des concentrations de contraintes en leur frontière, régulièrement relâchées en provoquant une petite sismicité. En zone Camélia, le glissement est plus lent mais intéresse un volume de roches plus important, englobant une partie de la zone émergée du platier qui présente un réseau de fractures visibles en surface, rendant la zone sans doute propice à des chutes de falaises. C'est en zone Françoise que les mouvements sont les plus rapides en profondeur (enregistrés avant le blocage d'un des capteurs).

Ces éléments conduisent à la nécessité de maintenir l'ensemble des capteurs en place.

Concernant l'évolution de la fracturation externe sous-marine, compte-tenu des difficultés posées par l'obtention de photographies aériennes depuis 1998, une solution utilisant un appareil léger, de type drone, est à l'étude en 2008.

---

**Des calculs d'effets hydrauliques ont été effectués pour divers scénarios de déstabilisation des flancs en zone Irène, avec des effets calculés au niveau local. Ces calculs seront étendus pour prendre en compte les effets sur les atolls distants tels que Tureia.**

---

### **3 - Perspectives 2008-2009 : Maintenance, Etudes**

#### ***Entretien des installations Telsite***

En 2006, une station de surface préventive destinée à pallier 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. Une expertise de tous les géophones a été effectuée lors de cette mission. 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). Ces mesures mettent en évidence la dégradation progressive des capteurs de la zone Nord provenant vraisemblablement pour une bonne part, des câbles. Des solutions de remplacement notamment pour les stations Camélia et Française devront donc être étudiées.

#### Mission de maintenance 2008

La prochaine mission de maintenance préventive est prévue début juin 2008. Lors de cette mission des boîtiers de brassage des voies des 2 géophones disponibles dans chaque forage, seront installés en tête de puits de toutes les stations sismiques.

#### Installation d'une station de surface complémentaire en zone Française

La détermination des localisations des événements ayant déclenché les quatre alertes sismiques survenues à la fin de l'année 2006 et début 2007, montre que ces événements se produisent légèrement à l'ouest de la station Française, située à l'extrémité du réseau sismique. La position des foyers située en dehors du réseau est donc mal contrainte et cela serait d'autant plus vrai au cas où les foyers se déplaceraient vers l'ouest. Afin d'améliorer la localisation de la sismicité de la zone Française et de disposer de meilleurs angles d'intersection des azimuts, l'ajout d'une station sismique 3 composantes aux alentours du PK11N est prévue en juin 2008. Cette station sera du même type que la station sismique de surface au PK5 et ne sera pas raccordée au système d'alerte mais les données seront retransmises à Bruyères-Le-Châtel. Bien qu'elle ne soit pas raccordée au système d'alerte, la station pourra être basculée sur celui-ci en cas de défaillance du géophone, servant ainsi de station de secours. Une prospection a été menée lors de la mission de février 2007. Plusieurs possibilités sont envisagées : l'installation préférée se situerait au niveau du pilier « TOPO23 », mais cela nécessite de faire passer les câbles au travers de la route pour les raccorder au système d'acquisition. Une alternative serait d'envisager une installation en retrait sur le platier au niveau de l'installation dite « Parthénon », à proximité du pilier topographique Française (environ 600 m à l'ouest de la station Française).

---

#### Fiabilisation de la liaison M4

La liaison de secours M4 a tendance à se bloquer relativement souvent. Dans l'attente de nouvelles solutions techniques qui ne pourraient apparaître qu'en 2010 (service BGAN d'Inmarsat), il convient de rechercher une solution de rechange à l'aide d'autres modems existants. Les services de communication maritime par satellite de la gamme Fleet sont des solutions techniques iso fonctionnelles du M4 et facilement implémentables en lieu et place. Leur spécificité (adaptation au milieu maritime) laisse espérer une meilleure robustesse de l'équipement, ce qui sera testé en préliminaire à leur installation.

#### Capteurs de submersion

Le déplacement des capteurs de submersion en Irène et en Viviane, qui ne sont pas en pleine eau, est envisagé.

#### ***Compléments de calculs d'effets hydrauliques***

Des calculs d'effets hydrauliques seront poursuivis et étendus à partir des scénarios de glissement en zone Irène pour prendre en compte les effets sur les atolls distants tels que Tureia. Ces calculs nécessiteront un calage préalable des données à distance à partir des données de la vague Tydée sur l'atoll de Fangataufa. Les calculs reprenant le scénario majorant en zone nord Camélia, seront affinés par rapport aux derniers calculs de 1998 prenant en compte les aspects dispersifs.

#### ***Relocalisation des événements sismiques***

Afin de mieux comprendre la microsismicité subsistant, un effort débuté en 2007 sera poursuivi en 2008-2009 pour reprendre une localisation plus fine des événements.

#### ***Analyse de la fracturation sous-marine par photographies aériennes***

Face aux difficultés de réalisation de campagnes de photographies aériennes par voie aéroportée, et la nécessité d'assurer une altitude basse, un projet reposant sur une recherche de solution utilisant un appareil léger de type drone sera proposé en 2008. Des organismes ont été contactés. Si le projet s'avère possible, une campagne photographique pourrait être envisagée en 2009.

---

### **CONCLUSION POUR LES PERSPECTIVES 2008-2009**

Afin d'améliorer les localisations des événements sismiques en zone Française, parfois situés à l'extérieur du réseau, l'installation d'une station complémentaire est prévue en 2008 vers le PK11N, à l'ouest de la station géophone existante au PK10N.

Un effort de localisation plus fine des événements sismiques sera poursuivi.

Un système d'interconnexion sera installé en tête de tous les puits géophone afin de permettre la connexion du capteur géophone de secours ou d'un capteur de surface en cas de perte d'un couple de géophones.

Des compléments de calculs hydrauliques seront poursuivis à partir des scénarios de glissement en zone Irène pour évaluer les effets sur les atolls voisins.

En vue de l'analyse de l'évolution de la fracturation sous-marine depuis 1998, la mise en oeuvre d'un projet d'acquisition de photographies aériennes à partir d'un appareil de type drone est envisagé en 2009.

---

#### **4 - Perspectives à moyen terme, Moyens minimaux à conserver**

##### ***Remplacement des capteurs défectueux***

Les missions de maintenance préventives seront poursuivies. Suite à la demande de la commission de sûreté (C3S) appuyée par le DSDN (réf.[ 9 ]), il est demandé au CEA/DAM de conduire une réflexion pour déterminer les moyens minimaux à conserver et pour étudier leur remplacement par de nouveaux capteurs compatibles avec les conditions actuelles de mise en œuvre. Dans les précédents bilans géomécaniques, il était indiqué que cette réflexion devrait s'appuyer sur les conclusions de l'étude de l'évolution prévisionnelle (réf [ 28 ]). Comme il a été indiqué ci-dessus, les conclusions de l'étude indiquent que les capteurs actuels constituent l'instrumentation minimum à conserver. Il n'est pas possible de réduire davantage le nombre et la nature des capteurs sans perdre des éléments d'appréciation indispensables de l'évolution. L'étude préconise donc le maintien des capteurs en place. En effet, l'évolution géomécanique, bien que très lente, est néanmoins active et présente quelques irrégularités ces trois dernières années. Afin d'être en mesure d'apprécier un niveau de risque qui repose sur un certain nombre d'indicateurs à prendre en compte, il est nécessaire de disposer de l'ensemble des capteurs séquentiels et sismiques.

Or, de même que le système d'acquisition, qui a fait en 2005 l'objet d'une refonte partielle, les capteurs en puits, géophones et inclinomètres, installés depuis 1994 et notamment les câbles de mesures auxquels ils sont connectés, subissent un vieillissement inéluctable. Par ailleurs, les câbles installés dans les forages inclinés latéraux, qui mesurent le déplacement des masses carbonatées en profondeur, peuvent subir également des blocages à l'intérieur même du forage. Ces dispositifs du système TELSITE étaient prévus pour une durée de vie d'environ 10 ans. Eux-mêmes ont remplacé des systèmes analogues installés auparavant. Une réflexion sur le remplacement des capteurs défectueux est donc à mener afin d'anticiper les pannes qui risquent de survenir dans les prochaines années. Les conclusions de l'étude de l'évolution prévisionnelle nous amènent à évaluer les conséquences, pour la surveillance, en cas de perte ou défaillance de ces dispositifs :

##### **Câbles ancrés en forages inclinés**

Concernant la perte éventuelle des câbles ancrés en profondeur, par exemple par blocage définitif, installés dans les forages inclinés latéraux (FIL), différentes solutions peuvent être envisagées selon les zones. Dans certaines zones comme en zone **Camélia** où les mouvements en surface sont les plus importants, les câbles perdus peuvent être partiellement compensés par des capteurs en surface permettant de suivre l'évolution des failles. La station GPS (GPS1) installée au bout de la digue Charlie permet un suivi compatible avec le mouvement des FIL. En revanche, en zone Irène et en zone Françoise, les stations GPS

placées en surface (Kilo pour la zone Française et Hôtel en zone Irène), bien que placées en extrémité des digues, **ne rendent pas compte des déplacements en profondeur**. Toute l'information sur l'activité en profondeur repose alors sur le géophone, ce qui est suffisant pour assurer l'alerte à 90s, mais ne l'est pas pour établir un diagnostic en cas d'évolution anormale. Ainsi :

Dans la zone **Française** : Cette zone est une des plus actives d'un point de vue sismique. C'est également la zone qui enregistre les mouvements en profondeur les plus rapides avant le blocage du câble à 45°. Il est donc indispensable de préserver une surveillance de son évolution. Cette zone est équipée d'une station GPS située sur la digue Kilo. En cas de perte des FIL (ce qui est actuellement le cas), l'examen croisé des données de fracturation, des mouvements en profondeur et de la sismicité par rapport à ceux observés en surface montre que cette station ne rend pas compte des mouvements en profondeur. En revanche cette station GPS est indispensable pour contrôler la stabilité du platier. En cas de blocage définitif ou de perte du câble, il faudrait donc étudier soit une opération de récupération du câble, soit réaliser un autre forage.

Dans la zone **Irène** : Cette zone est située à proximité immédiate de la zone aéroportuaire. Un suivi en profondeur demeure indispensable aux diagnostics d'évolution en temps réel ou à court terme. Cette zone est équipée d'une station GPS située sur la digue Hôtel. Comme pour la zone Française, en cas de perte des FIL, l'examen croisé des données de fracturation, des mouvements en profondeur et de la sismicité par rapport à ceux observés en surface montre que cette station ne rend pas compte des mouvements en profondeur. En revanche elle est indispensable pour contrôler la stabilité du platier. Comme pour la zone Française, les mêmes opérations de tentative de récupération des câbles en cas de blocage, ou une réinstrumentation, peuvent être étudiées.

Cependant, l'étude sur l'apport de l'imagerie pourrait fournir des éléments palliatifs ponctuels. En effet l'étude montre une certaine corrélation entre la vitesse d'ouverture des fractures immergées et la courbe d'évolution du déplacement des câbles (réf.[ 31 ]). Il existe donc peut-être un comportement de tendance similaire entre les mouvements en profondeur et le jeu des failles en surface, bien que le lien du point de vue mécanique ne soit pas établi. Cependant, ces observations, si elles étaient confirmées par des analyses poursuivies à partir de clichés récents, pourraient être envisagées comme voie alternative de recours aux mesures en profondeur. Ces mesures n'auraient toutefois qu'un caractère palliatif et ne prétendraient pas remplacer une mesure en profondeur, qui plus est, délivrée en temps réel.

### Inclinomètres

Les inclinomètres installés en zone Camélia, destinés au suivi de l'évolution du mouvement des couches carbonatées en profondeur, participent également aux indicateurs d'évolution. A ce jour, il n'y a pas de solution palliative à proposer. Seules peuvent être envisagés des opérations de récupération de la chaîne inclinométrique en vue d'un remplacement ou la réalisation d'un nouveau forage.

---

## Géophones

Les géophones sont indispensables à l'alerte à 90s ainsi qu'au suivi de l'évolution de la sismicité à court et moyen terme. Leur vieillissement est également inéluctable. Le maintien d'une instrumentation en profondeur est souhaitable car elle permet une amélioration du rapport signal à bruit (moins sensible à la perturbation par les éléments naturels, houle, vents, tempêtes), ce qui permet de limiter les fausses alertes, tout en disposant d'une meilleure écoute de la microsismicité en profondeur. Comme pour les autres dispositifs en profondeur, une étude de récupération du capteur et des câbles de mesures devrait être envisagée ou à défaut, une réinstrumentation avec un nouveau forage. Dans tous les cas, la perte possible des géophones doit être prévue. Des géophones en surface pourraient être une mesure palliative, avec le risque cependant de ne pas conserver les performances du système au même niveau. Si les capteurs en surface permettraient toujours d'assurer l'alerte, l'une des fonctions principales du système Telsite, la présence d'un bruit de fond en surface plus élevé (houle, vent, tempêtes) pourrait en compliquer la gestion avec le risque de fausses alertes. Par ailleurs, les capteurs en surface seront plus éloignés des sources sismiques, l'écoute de la sismicité à bas niveau, vis-à-vis de la surveillance à long terme, pourrait se trouver modifiée par rapport au niveau actuel. Afin d'assurer une continuité vis-à-vis des indicateurs d'évolution, les caractéristiques des nouvelles observations pouvant différer, une période de recouvrement d'un an des mesures des capteurs en profondeur et en surface est nécessaire. Ces installations doivent donc être anticipées et sont en cours.

Un état complet des capteurs sera effectué à l'issue de la mission de maintenance du mois de juin 2008, puis une étude de faisabilité sur le remplacement des capteurs en puits sera menée si nécessaire en fonction de ces résultats.

Ces évaluations comprendraient une étude des solutions techniques et des coûts associés.

### ***Recherche de meilleures solutions de transmissions site-métropole :***

#### Liaison de secours M4 :

Selon les résultats apportés par le changement de transmetteur Inmarsat, la liaison de secours (actuellement M4) pourrait être remplacée par une liaison Inmarsat BGAN (couverture satellite du Pacifique prévue en 2009).

#### Liaison VSAT Mururoa :

Les services de Papeete passeraient par l'utilisation d'un système déployé et opéré par France Telecom, et utilisé pour les stations OTICE du DASE. Cependant, cette solution amènerait des modifications de l'architecture du système en base arrière. Les réflexions sur ce sujet doivent être approfondies.

---

### ***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. Un projet sera proposé en fin 2008-2009.

### ***Faisabilité du suivi des déformations par télémétrie radar***

Les réflecteurs artificiels permanents pourraient fournir un moyen de suivi des déformations de l'atoll de Mururoa, notamment des mouvements verticaux. Les satellites de dernière génération comme TerraSAR-X ont été lancés mi-2007, des tests sont donc nécessaires avant de statuer sur la faisabilité de la technique à Mururoa. Des images sont en cours d'acquisition. Elles seront analysées au cours de l'année 2009 afin de valider l'adaptation de la technique selon les mouvements à suivre, horizontaux et verticaux, et aux conditions du site. Un projet est en cours d'élaboration.

## **CONCLUSION POUR LES PERSPECTIVES A MOYEN ET LONG TERME**

Selon les recommandations de l'étude géomécanique, l'ensemble du dispositif Telsite doit être conservé, ce qui signifie de prévoir le remplacement des capteurs défectueux. Dans un premier temps, il est avant tout indispensable de maintenir à niveau le réseau sismique, seul ensemble de capteurs sur lequel repose l'alerte. Aussi, des solutions de secours, par doublement ou possibilité de bascule, à partir de géophones installés en surface, sont progressivement mises en place. Par la suite, afin d'assurer la continuité des observations de sismicité au même niveau qu'auparavant, la question de la nécessité, ainsi que de la faisabilité du remplacement, en prévision d'une perte définitive, des géophones en puits, devra être considérée.

Il s'agirait d'étudier les moyens nécessaires si l'on voulait couper et retirer les câbles du géophone défectueux en puits et réinstaller un capteur au-dessus du géophone pré-existant.

L'ensemble du système participant au diagnostic d'évolution étant indispensable, il conviendra d'étudier également les possibilités de remplacement des capteurs inclinométriques et câbles inclinés latéraux en puits ainsi que de leurs câbles de mesures associés. En effet, les mesures de surface, par GPS, fournissent des informations permettant de vérifier la stabilité du platier, mais elles ne procurent pas d'indications sur les mouvements profonds.

L'évolution des failles bordières, plus externes, est sans doute plus représentative de ces mouvements profonds. C'est pourquoi, la poursuite de l'étude de la fracturation immergée à partir de photographies aériennes pourrait apporter des éléments ponctuels utiles à la surveillance à long terme. Des solutions à partir d'appareils légers de type drone sont envisagées.

Une recherche de solutions plus fiables de transmissions site-métropole sera entreprise.

La rénovation du système de centralisation au niveau du PCT à Mururoa (UTS) qui n'a pas été effectuée en 2005, sera à prévoir dans les 3 à 5 ans.

Des études prospectives, de suivi de déformation en surface, à partir de l'imagerie satellitaire et interférométrie radar se poursuivront.

---

## **5 - Bilan d'Instrumentation de l' atoll de référence Rangiroa sur 2 ans**

### ***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 24 un plan de l'atoll donnant une indication sur sa géomorphologie et l'implantation des sites remarquables ou instrumentés. La Figure 25 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.

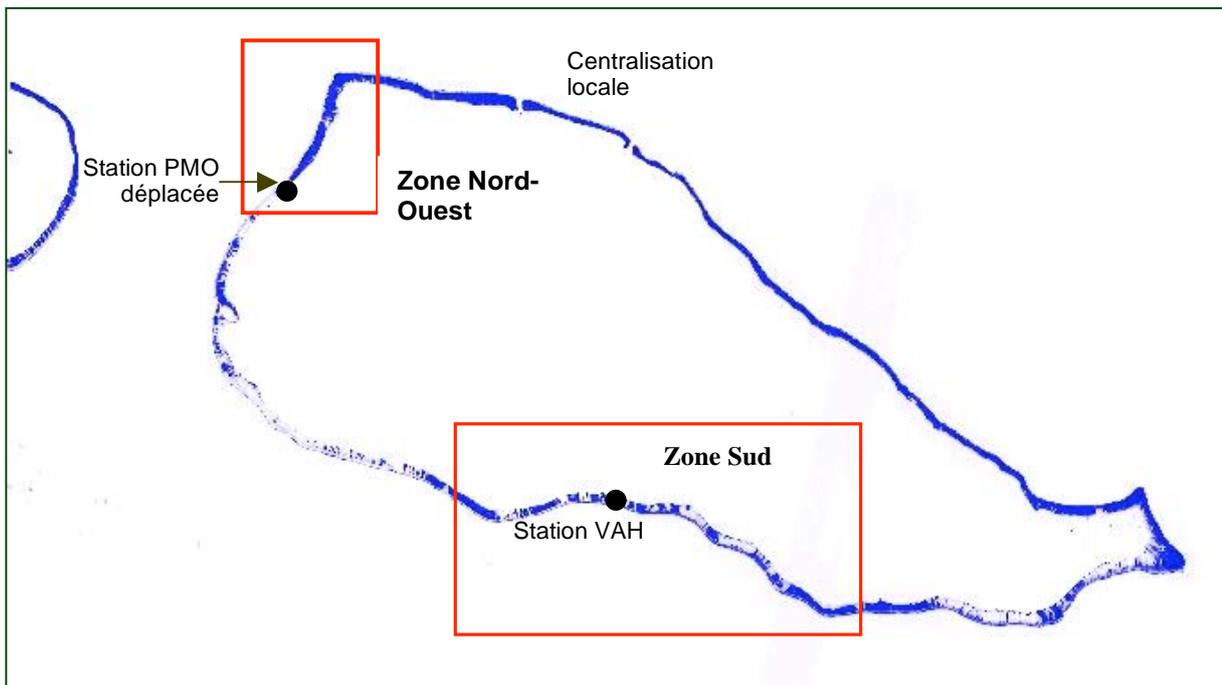
Cette adaptation de l'instrumentation de Rangiroa avait pour objectif d'atteindre des capacités de détection et de caractérisation proches des stations de surface à Mururoa. Pour ce faire, on a déplacé la station PMO (ou PMOR) vers la côte pour se rapprocher du secteur fracturé au nord ouest de Rangiroa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

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.

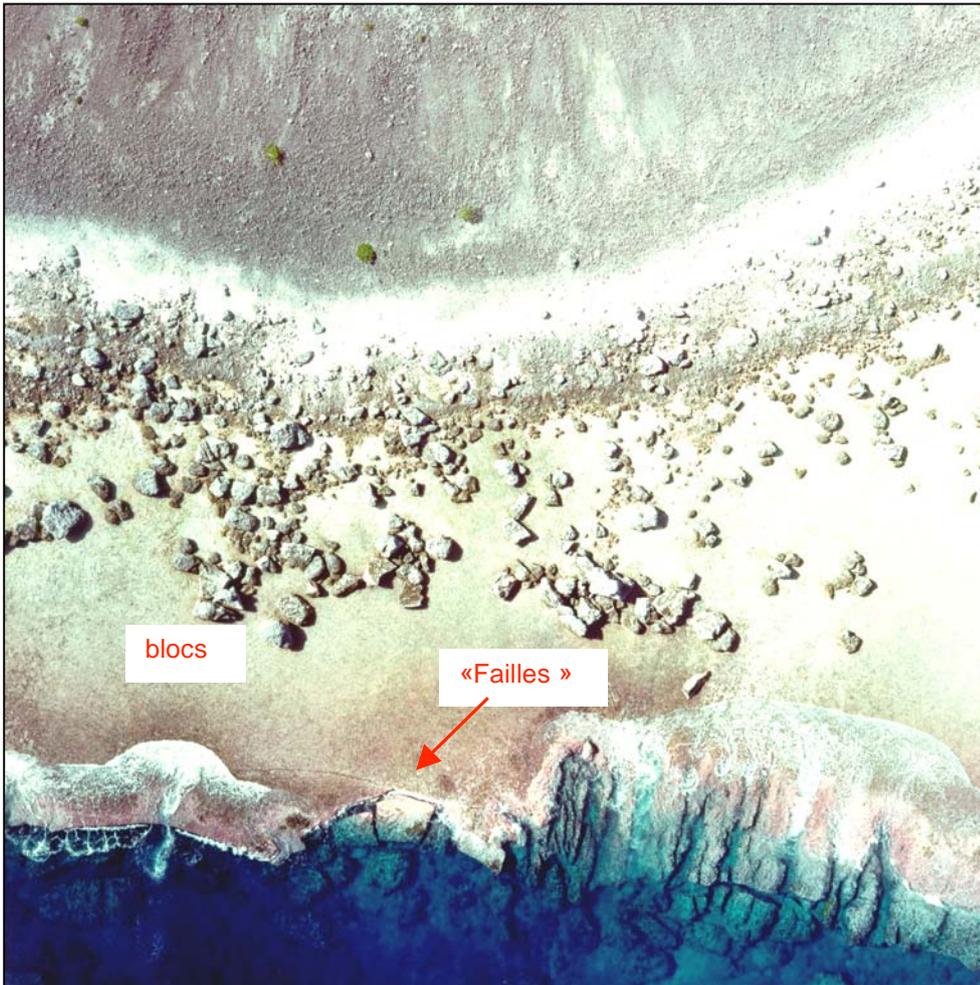
---

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.

Etant donné la faiblesse de la sismicité enregistrée, le fonctionnement des stations dans le cadre du projet Surveillance des Sites n'est plus financé depuis 2006. Une activité sismique, bien que très faible, est malgré tout enregistrée en 2005 et 2007. Nous reportons ci-dessous le bilan des observations sismiques sur la période 2003 et 2007.



**Figure 24** : 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.

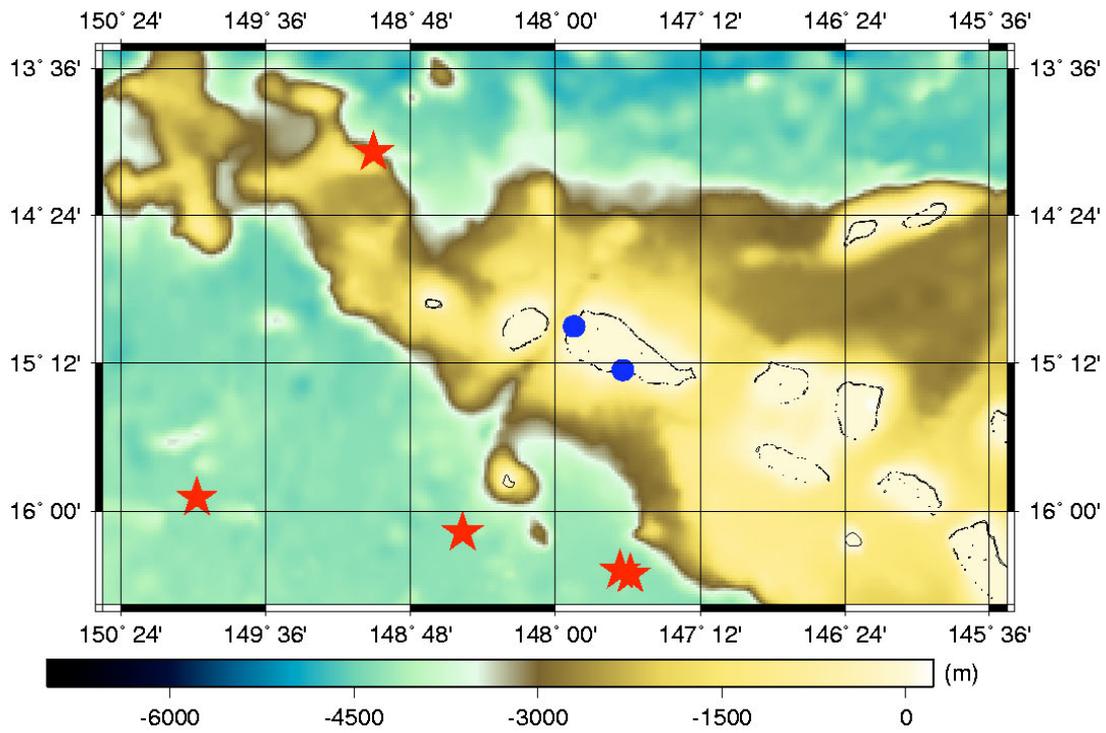


**Figure 25** : Vue de Rangiroa. Photographie aérienne du platier en zone nord-ouest prise en 1981

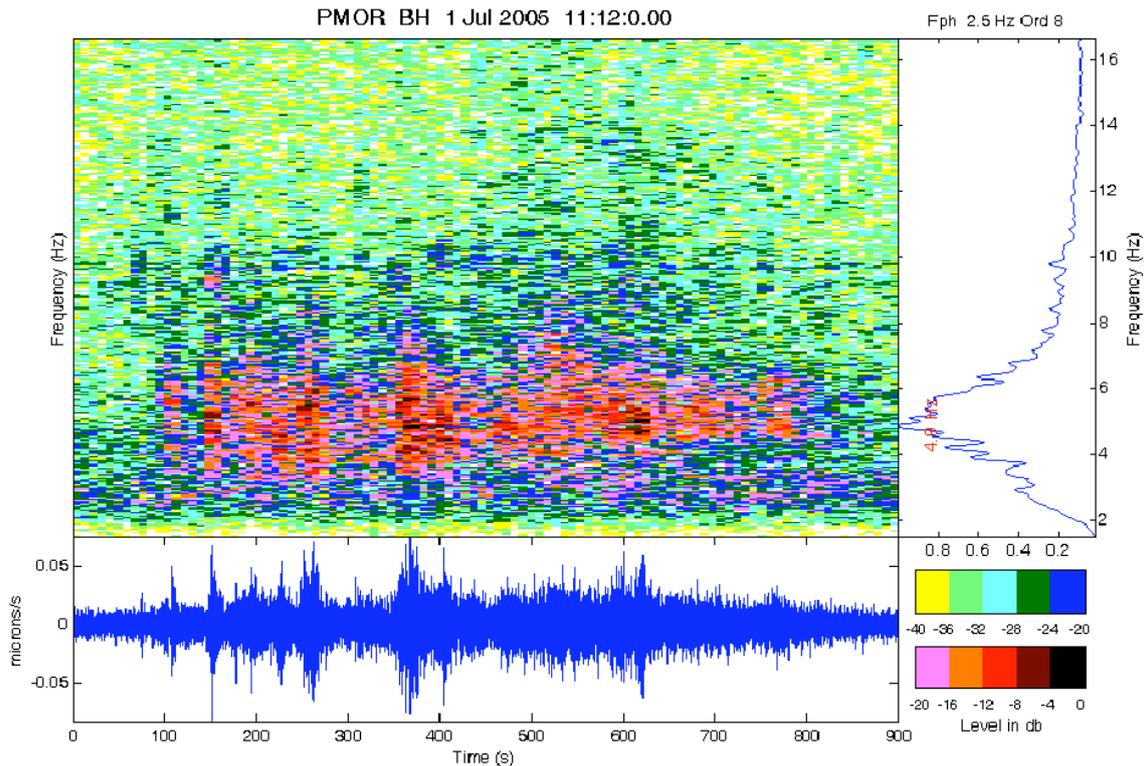
### ***Bilan de sismicité de janvier 2003 à fin 2007***

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 2003-2006, le séisme le plus proche est situé à plus de 45 km de la station de PMO (Figure 26).

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 (Figure 27), 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.



**Figure 26 :** Sismicité autour de Rangiroa de janvier 2003 à fin 2005 : Aucun séisme n'a été détecté à proximité de Rangiroa durant cette période. Seuls quelques séismes en bordure du plateau des Tuamotu, assez classiques, ont été enregistrés (les magnitudes sont comprises entre 1,8 et 3,1).

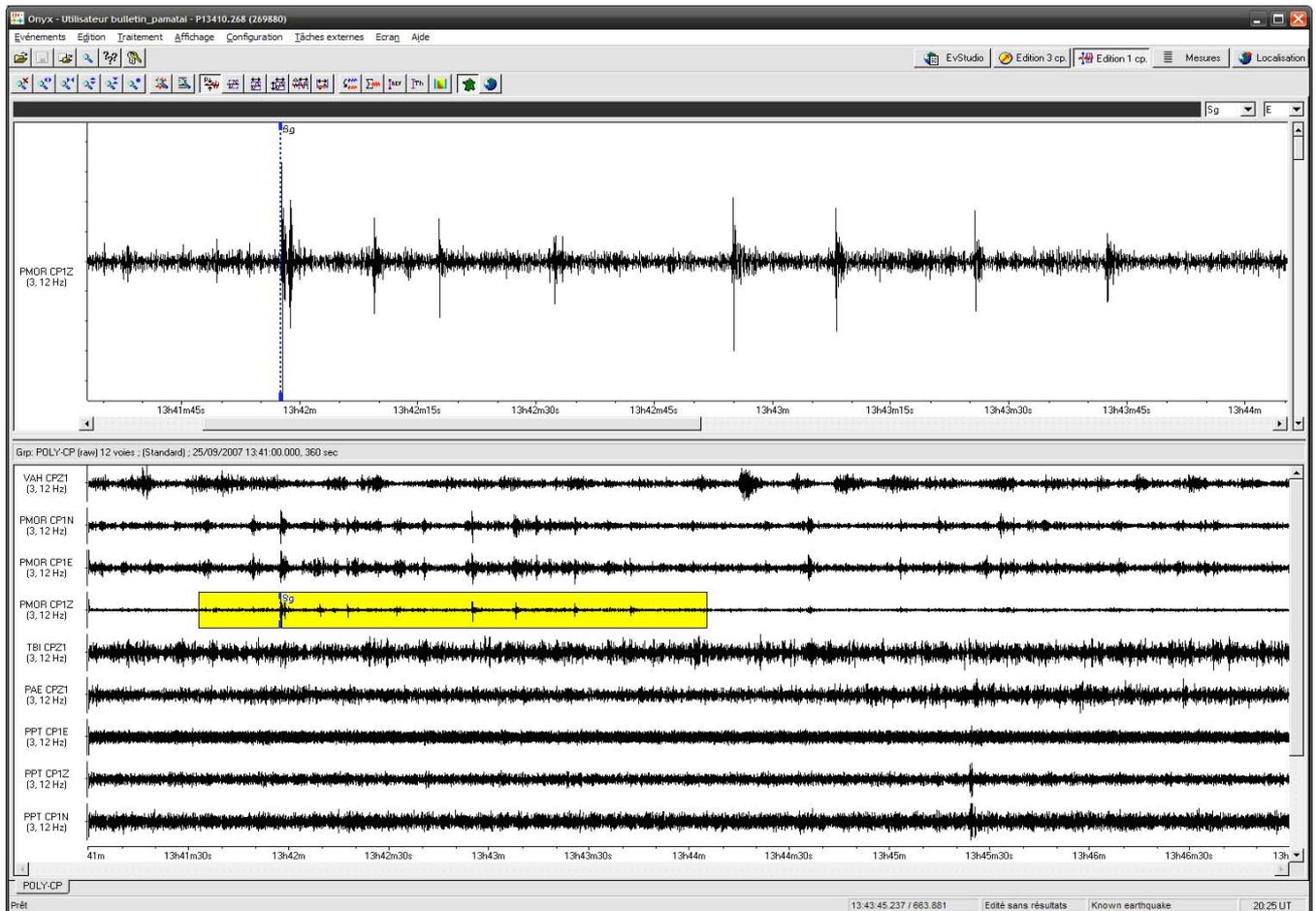


**Figure 27 :** Signal sismique (en bas) et analyse temps-fréquence (en haut et à droite) enregistré à la station de PMO à Rangiroa le 1 juillet 2005. Le signal est constitué de séquences courtes et relativement impulsives pouvant être celui d'un éboulement.

Fait très exceptionnel, une vingtaine de microséismes ont été détectés sur la station de PMOR entre le 1<sup>er</sup> août et le 25 septembre 2007, ceci n'était jamais arrivé depuis l'existence de la nouvelle station de PMOR (réf. [ 38 ]). 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.

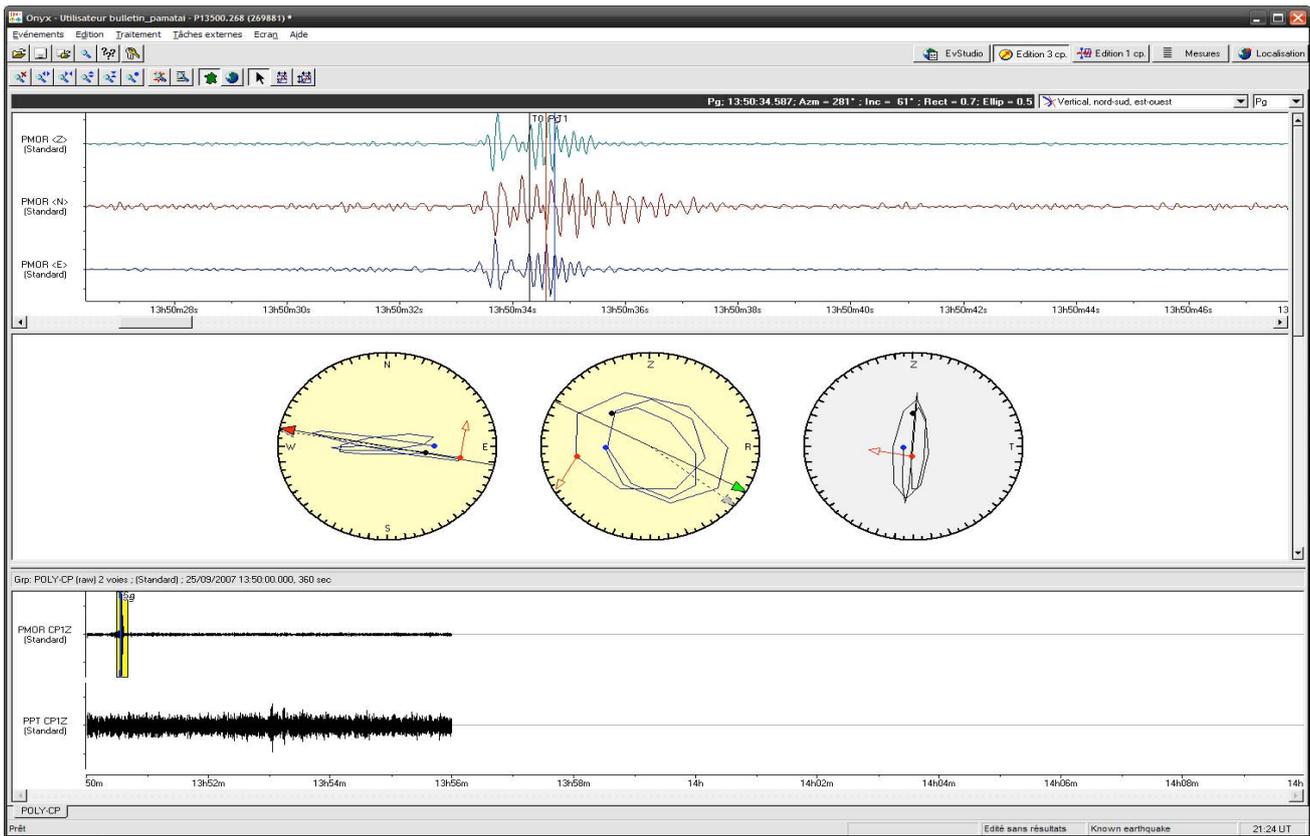
La séquence a démarré par une douzaine d'événements entre le 1<sup>er</sup> et le 3 août, suivie de quelques relâchement de contrainte (RC) isolés les 4, 12, 17 août, et puis 7 et 14 septembre. La séquence s'est terminée par une « rafale » finale d'une dizaine de RC en deux séquences le 25 septembre (Figure 28). Tous ces RC 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].

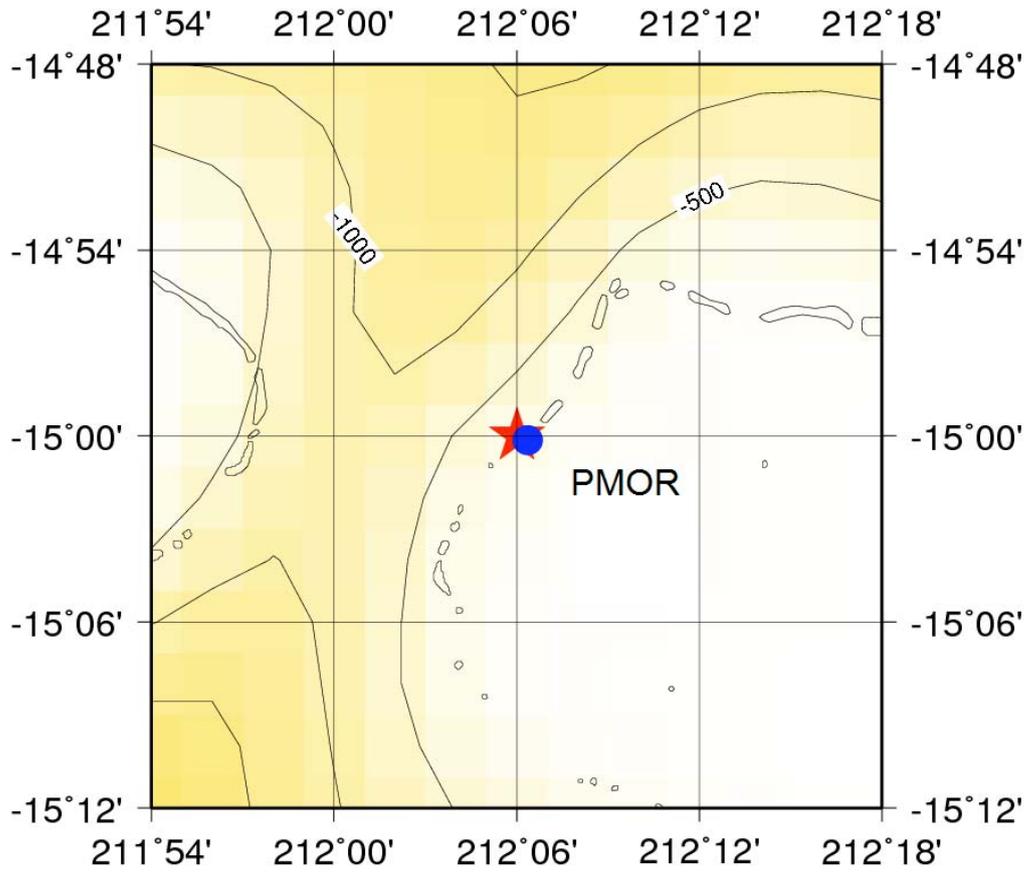


**Figure 28:** Première séquence de la rafale composée de 8 petits événements du 25/09/2007 vers 13h41: Les amplitudes des ondes Sg ne dépassent pas 4 nanomètres ; les ondes Pg sont à peine visibles. La durée individuelle d'un microséisme est d'environ 3.5 s. (réf.[ 38 ]).

Seuls 4 événements sont localisables, en utilisant l'azimut donné par l'analyse de polarisation et les temps d'arrivée des ondes Pg et Sg (Figure 29). Les épicentres sont situés à quelques centaines de mètres à l'ouest de la station (l'azimut est d'environ 270°), du côté externe de la barrière récifale (Figure 30). La source de ces événements et leur interprétation peut être attribuée à une micro-fracturation du platier voisin de la station, sur les pentes externes.



**Figure 29** : Mouvement de particule du microséisme isolé du 25/09/2007 à 13h50, montrant une polarisation elliptique d'onde de surface



**Figure 30:** Localisation des RC au voisinage de la station de PMOR: l'étoile représente l'épicentre et le rond bleu la station.

## **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. Des événements de ce type sont les premiers observés. Ces faits restent très exceptionnels, et bien que les amplitudes de ces événements soient 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.

## **6 - Liste des figures**

Figure 1 : Carte de l'atoll de Mururoa avec les zones surveillées et les points instrumentés. ....	8
Figure 2 : Schéma général du fonctionnement du système de surveillance automatique TELSITE. ....	8
Figure 3 : Détail de l'implantation de l'instrumentation de la zone nord-est de Mururoa. ....	9
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.....	10
Figure 5 : Historique de la répartition spatiale de la microsismicité en zone nord-est. Evénements localisés en 2000 (rose), 2003 (rouge) et de janvier à avril 2004 (rouge foncé). La sismicité antérieure à 1997 est représentée par les cercles gris. ....	12
Figure 6 : Répartition par zone et par année (barres) et nombre d'événements par semaine (courbe rouge). ....	13
Figure 7 : Activité sismique cumulée en zone nord-est de Mururoa.....	13
Figure 8 : Carte de la localisation des 2 alertes des 12 janvier et 11 octobre 2007 (étoiles) par rapport à la sismicité générale. Les cercles verts indiquent les localisations déterminées pour les 3 alertes s'étant produit fin 2006. Remarque : la localisation de l'événement du 11/10/2007 a été légèrement révisée par rapport à la note (réf.[ 36 ] ).....	15
Figure 9 : Signaux sismiques correspondant à l'événement du 11/10/2007, localisé en limite des zones en mouvement Camélia et Françoise. Ces signaux sont caractéristiques d'un événement de type relâchement de contrainte.....	16
Figure 10 : Magnitudes observées depuis l'installation du système TELSITE déduites des amplitudes automatiques de la base de données. Parmi les huit événements de magnitudes supérieures ou égales à 1.4 (flèches), les sept premiers se produisent en zone Françoise, celui du 11/10/2007 en zone Camélia. ....	17
Figure 11: 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 1990 à 2007. ....	19
Figure 12 : Déplacements mesurés par les câbles implantés dans les forages inclinés à 45 degrés (FIL 10 45, longueur de 514 m) et à 40 ° (FIL 10 40, longueur de 448 m) en zone Françoise, de 1996 à 2007 (en bas) et historique du déplacement depuis 1987 du FIL 10 45 (en haut). ....	22
Figure 13 : Déplacements mesurés par les câbles implantés dans les forages inclinés à 45° (courbe bleue : FIL5.45°, longueur 427 m) et à 30° (courbe bleu clair : FIL 5.30, longueur 267 m) en zone Irène. ....	23
Figure 14 : Evolution du capteur inclinométrique du forage GEO8B (n° 29) en zone Camélia implanté dans les dolomies à 350 m de profondeur. ....	26

Figure 15: Evolution du capteur inclinométrique du forage GEO8B (n°22) en zone Camélia implanté dans les calcaires crayeux à 451 m de profondeur. ....	26
Figure 16: Carte de sismicité traitée dans les secteurs nord-est, sud-est et sud-ouest pour les années 2000, 2003 et de janvier à avril 2004, en fonction de l'amplitude maximale du signal sur la station la plus proche. ....	27
Figure 17: Evénements microsismiques en zone Simone qui ont fait l'objet d'une localisation, représentés en fonction de la profondeur. Dégradés de bleus : Année 2000, 2003 et de janvier à avril 2004 en bleu. Points jaunes : Années 1980-1996. ....	28
Figure 18 : Exemples de signaux d'une série de quatre relâchements de contrainte observés par la station Simone située en zone sud-est de Mururoa, le 23 août 2007. ....	29
Figure 19 : Mécanisme de déformation des zones en mouvement Françoise (a), Camélia (b), Irène (c).....	30
Figure 20 : Résultats de l'analyse géomécanique (réf. [ 28 ]) : déplacements horizontaux mesurés en surface superposés avec la carte de fracturation observée dans la zone Camélia. Les fractures observées sur le platier sont en rouge, la faille longitudinale continue est la faille F1. Les failles sous-marines (bordières) sont en double trait bleu, les digues sont en jaune, et les limites de zones sont en tirets (violet = sous-zones C1 et C2; rose = zone Camélia). Les flèches bleues indiquent les directions et amplitudes (facteur d'échelle de 10000) des déplacements mesurés entre les deux campagnes topographiques de 1996 et 2001. La flèche rouge correspond au déplacement le plus important mesuré. Deux groupes de direction suggèrent l'existence de deux sous-zones C1 et C2. ....	31
Figure 21 : Exemple d'image aérienne étudiée (acquise en 1998) d'une portion de la zone Irène (98_F3_10). ....	33
Figure 22 : Cartographie de la fracturation réalisée à partir de l'image aéroportée de la Figure 21.....	33
Figure 23 : Résultats de nivellement des digues de la campagne 2007. Comparaison des évolutions des vitesses de déplacements verticaux des repères situés sur les digues entre les périodes 1996-2001 et 2001-2007 (en haut) montrant un ralentissement général de 50 à 70% (en bas) pour la zone située entre les digues Charlie-Delta et Kilo, excepté en trois points (DN41, JN07, JN08) situés aux extrémités de la digue Charlie-Delta. La zone située entre les digues India et Echo ne montre pratiquement plus de mouvement vertical. ....	37
Figure 24 : 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. ....	51
Figure 25 : Vue de Rangiroa. Photographie aérienne du platier en zone nord-ouest prise en 1981.....	52
Figure 26 : Sismicité autour de Rangiroa de janvier 2003 à fin 2005 : Aucun séisme n'a été détecté à proximité de Rangiroa durant cette période. Seuls quelques séismes en bordure du plateau des Tuamotu, assez classiques, ont été enregistrés (les magnitudes sont comprises entre 1,8 et 3,1). ....	53
Figure 27 : Signal sismique (en bas) et analyse temps-fréquence (en haut et à droite) enregistré à la station de PMO à Rangiroa le 1 juillet 2005. Le signal est constitué de séquences courtes et relativement impulsives pouvant être celui d'un éboulement. ....	54

---

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.[ 38 ]).	55
Figure 29 : Mouvement de particule du microséisme isolé du 25/09/2007 à 13h50, montrant une polarisation elliptique d'onde de surface.....	56
Figure 30: Localisation des RC au voisinage de la station de PMOR: l'étoile représente l'épicentre et le rond bleu la station. ....	57

---

## **7 - Références**

- [ 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 ] Refonte partielle du système Telsite 2003-2005, cahier des charges étape 3a, L. Bosca, S. Denis, CEA/DIF/DASE/STMG/DO 102 du 21/04/05, ENV SURGE RBR CDC CP 050115 A.
  - [ 8 ] Refonte Partielle du système TELSITE 2003-2005, Analyse fonctionnelle du système Telsite existant, M. Bordesoules, CEA/DIF/DASE/STMG DR 13 du 13/05/04, ENV SURGE RBD DAF CP 04 07 30B.
  - [ 9 ] Inspection du Centre d'expérimentation du Pacifique, DSND DR 199 du 10/06/04 diffusé le 17/06/04.
  - [ 10 ] TELSITE : Rapport de mission de remplacement des transmissions locales et de maintenance préventive, D. Rinsant, CEA/DIF/DASE/STMG/DO 110 du 05/07/04.
  - [ 11 ] Refonte Partielle du système TELSITE 2003-2005, expression du besoin- Indice B, L. BOSCA, CEA/DIF/DASE/STMG DR 25 du 06/08/2004, ENV SURGE RBD DAP CP 04 07 30B.
  - [ 12 ] Compte-rendu de revue de projet DSCEN-DMSE-DASE du 05 juillet 2004, CEA/DAM/DMSE DO 403 du 11/08/04, ENV SUR STT CRR CP040705A.
  - [ 13 ] Demande de mission d'inspection et de prospection des infrastructures sur site, CEA/DIF/DASE/LDG DO 447 du 07/09/04.
  - [ 14 ] Surveillance de l'évolution géomécanique de Mururoa. Evolution géologique des Atolls de Mururoa et de Rangiroa, Bilan 2003, CEA/DIF/DASE/LDG DO 529 du 20/10/04, ENV.SURGE.R.BB.DET.CP.04.10.20.A.
-

- 
- [ 15 ] Refonte partielle du système Telsite 2003-2005, Dossier de définition -Refonte Etape 3b (GPS), M. Bordesoules, J. Rouault, JC. Dudouet, L. Bosca, M. Flouzat, CEA/DIF/DASE/STMG DO 232 du 17/11/04, ENV SURGE RBD DDD CP 01 11 04 A.
- [ 16 ] Refonte partielle du système Telsite 2003-2005, Dossier de justification de la définition GPS – Etape 3b, M. Bordesoules, J. Rouault, JC. Dudouet, L. Bosca, M. Flouzat, CEA/DIF/DASE/STMG DR 30 du 17/11/04, ENV SURGE RBD DJD CP 04 11 04A.
- [ 17 ] Compte-rendu de mission d'inspection des infrastructures sur site, CEA/DIF/DASE/LDG DO 585 du 26/11/04, ENV.SURGE.RBB.CRM.04.12.23.A.
- [ 18 ] Outil lochypo de localisation des données Telsite, validation et tests, Y. Cano, C. Antoine, C. Bergeron, M. Flouzat, JP. Santoire, CEA/DIF/DASE/LDG DO 1 du 3/01/05, ENV.SURGE.R.BB.DET.CP.05.01.03A.
- [ 19 ] Cahier de recette des capteurs Telemac, CEA/DAM/DE Service TME, type d'appareil fissuromètre n°141, du 21/03/90.
- [ 20 ] Refonte partielle du système Telsite 2003-2005, Analyse fonctionnelle du système existant, M. Bordesoules, CEA/DIF/DASE/STMG, DO102, ENV SURGE RBR CDC CP 05 01 15 A, 21/04/05.
- [ 21 ] 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.
- [ 22 ] Evolution géomécanique des atolls de Mururoa et Rangiroa- Bilan 2004, M. Flouzat, Y. Cano, JP. Santoire, F. Adjémian, C. Antoine, D. Reymond, CEA/DIF/DASE/LDG DO 364 du 05/07/05, ENV.SDURGE.R.BB.DET.CP.05.07.06.A.
- [ 23 ] Telsite, Compte-rendu de mission d'installation des nouvelles infrastructures du 12 au 27 juillet 2005, D. Rinsant, CEA/DIF/DASE/STMG/DO 248 du 7/10/05.
- [ 24 ] Analyse de photos aériennes des sites d'expérimentation (mission 2004), G. Guille, CEA/DIF/DASE/LDG/DO 655 du 23/11/05, ENV.SURGE.R.BB.DET.CP.05.11.29.A.
- [ 25 ] Refonte partielle du système Telsite 2003-2005. Dossier de définition de l'architecture générale du système - Refonte étape 3(a-b). M. Bordesoules, E. Ardoin, JC. Dudouet, L. Bosca, J. Rouault, D. Rinsant, CEA/DIF/DASE/STMG/DO 29 du 02/02/06, ENV SURGE RBD DDD CP 060116 A.
- [ 26 ] Campagne topographique sur les atolls de Mururoa et Fangataufa, cahier des charges, M. Flouzat et JP. Bourdonnec, CEA/DIF/DASE/LDG/DO 180 du 17/03/06, ENV.SURGE.R.BB.DET.CP.060331.A.
- [ 27 ] Refonte partielle du système Telsite 2003-2005, Compte-rendu détaillé d'installation et de validation, E. Ardoin, CEA/DIF/DASE/STMG/DO 74 du 13/04/06, ENV SURGE RBD DAF CP 060412 A.
- [ 28 ] Etude de l'évolution géomécanique de Mururoa, Note de synthèse, M. Flouzat, F. Adjémian, Ch. Mariotti, CEA/DIF/DASE/LDG/DR 13 du 17/03/06.
- [ 29 ] Evolution géomécanique de l'atoll de Mururoa et Rangiroa, Bilan 2005, M. Flouzat, JP. Santoire, D. Reymond, CEA/DIF/DASE/LDG/302/2006/DO du 19/05/2006.
-

- 
- [ 30 ] Compte-rendu de mission Telsite du 9 au 21 mai 2006, E. Ardoin-Perreault, CEA/DIF/DASE/STMG/DO 12 du 16/06/2006.
- [ 31 ] Apport de la télédétection pour la surveillance géomécanique de l'atoll de Mururoa, CEA/DIF/DASE/LDG/DR 42 du 29/11/2006.
- [ 32 ] Note d'information sur l'événement du 27 novembre 2006 ayant déclenché l'alerte Telsite. CEA/DIF/DASE/LDG DO 674 du 06/12/06.
- [ 33 ] Note d'information sur l'événement du 29 novembre 2006 ayant déclenché l'alerte Telsite. CEA/DIF/DASE/LDG DO 687 du 12/12/06.
- [ 34 ] Note d'information sur l'événement du 02 décembre 2006 ayant déclenché l'alerte Telsite. CEA/DIF/DASE/LDG DO 697 du 15/12/06.
- [ 35 ] Demande de travaux à Mururoa, CEA/DIF/DASE/STMG DO 248/06 du 22/12/2006.
- [ 36 ] Note d'information sur l'événement du 12 janvier 2007 ayant déclenché l'alerte Telsite. CEA/DIF/DASE/LDG DO 46 du 19/01/07.
- [ 37 ] H. Hebert, A. Gachon, Modélisation des effets hydrauliques de glissements sous-marins à Mururoa, Calage des paramètres de la source, CEA/DIF/DASE/LDG/DO 424 du 05/07/07
- [ 38 ] D. Reymond et O. Hyvernaud, Activité sismique exceptionnelle de l'atoll de Rangiroa du 1<sup>er</sup> août au 25 septembre 2007, note LDG.PAC du 15/10/2007.
- [ 39 ] Note d'information sur l'événement du 11/10/2007 ayant déclenché l'alerte Telsite, CEA/DIF/DASE/LDG/DO 603 du 19/10/07.
- [ 40 ] H. Hébert, A. Gachon, Etude des effets hydrauliques liés à des glissements de terrain à Mururoa, CEA/DIF/DASE/LDG/18/2008 DR du 14/02/2008.
- [ 41 ] 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.
-

**DESTINATAIRES**

DSCEN – M. POIRRIER et M. MUSA (2 ex)

16 bis rue Prieur de la Côte d'or

94114 ARCUEIL CEDEX

---