

MINISTÈRE DES ARMÉES

DIRECTION DES OPÉRATIONS

DIRECTION GÉNÉRALE
DE L'ARMEMENT

UNITÉ DE MANAGEMENT NUCLÉAIRE
BIOLOGIQUE ET CHIMIQUE

DÉPARTEMENT DE SUIVI
DES CENTRES D'EXPÉRIMENTATIONS NUCLÉAIRES

SURVEILLANCE DES ATOLLS DE MORUROA ET DE FANGATAUFA



TOME II
BILAN GEOMECANIQUE
Année 2021

N°243 DGA/DO/UM NBC/SCEN du 09 septembre 2022
CEA/DIF/DASE/LDG/173/2022/DO (C) du 06 septembre 2022

Résumé

Ce rapport présente le bilan pour l'année 2021 de l'évolution géomécanique des atolls de Moruroa et de Fangataufa, anciens sites d'expérimentations du Pacifique. Ce bilan est réalisé à partir des données continues acquises en temps réel par le système de télésurveillance TELSITE. Les résultats, dans la continuité de ceux de l'an passé, indiquent un mouvement faible en ralentissement. Ce document présente également les résultats de la campagne topographique spécifique de 2021.

Sommaire

1. RESUME.....	3
2. LA SURVEILLANCE GEOMECANIQUE DE L'ATOLL DE MORUROA.....	4
2.1. SUIVI CONTINU DE L'EVOLUTION DE MORUROA.....	4
2.2. COMPOSANTES DU SYSTEME DE TELESURVEILLANCE TELSITE	6
2.3. CAMPAGNES COMPLEMENTAIRES DE CARACTERISATION DE L'EVOLUTION DES ATOLLS	10
3. BILAN DE L'EVOLUTION DE LA ZONE NORD-EST MESUREE EN 2021	11
3.1. SISMICITE	11
3.2. DEPLACEMENTS ET DEFORMATIONS EN SURFACE.....	24
3.3. DEPLACEMENTS ET DEFORMATIONS EN PROFONDEUR	33
3.4. SYNTHESE DE L'ACTIVITE EN ZONE NORD-EST	44
4. BILAN DE L'EVOLUTION DANS LE SECTEUR SUD-EST (ZONE SIMONE).....	48
5. CAMPAGNE TOPOGRAPHIQUE 2021 : PRINCIPAUX RESULTATS.....	50
5.1. PRINCIPAUX RESULTATS POUR MORUROA	50
5.2. PRINCIPAUX RESULTATS POUR FANGATAUFA	51
5.3. INTERPRETATION POUR LA ZONE NORD-EST DE MORUROA.....	51
6. FONCTIONNEMENT DU SYSTEME TELSITE EN 2021.....	51
6.1. DISPONIBILITES DES MESURES	51
6.2. FAITS MARQUANTS ET ACTIONS DE MAINTENANCE	52
6.3. BILAN DU FONCTIONNEMENT DE TELSITE POUR L'ANNEE 2021	53
7. CONCLUSION GENERALE.....	54
8. GLOSSAIRE	55
ANNEXE 1 – ANALYSE DE LA SISMICITE EN TERMES D'ENERGIE.....	56
ANNEXE 2 – SUIVI TEMPOREL DE LA SITUATION GEOMECANIQUE ET DU NIVEAU DE RISQUE DE LA ZONE NORD-EST DE MORUROA.....	57

1. Résumé

Dans le cadre de la surveillance des atolls de Moruroa et Fangataufa, le suivi de l'évolution géomécanique a été confié par le ministère des Armées au CEA/DAM. Il repose sur le système automatique de télésurveillance TELSITE (TELésurveillance de SITE) qui a été entièrement rénové entre 2016 et 2018. Ce rapport décrit le dispositif opérationnel depuis fin août 2018, et présente le bilan de l'évolution géomécanique et du fonctionnement du système de surveillance pour l'année 2021.

Dans une première partie, les missions du programme de surveillance et les principaux éléments du système TELSITE sont rappelés. Le bilan de l'évolution de la zone Nord-Est de Moruroa est ensuite exposé pour l'année 2021. Il s'appuie sur les données des stations sismiques pour analyser l'activité microsismique, des capteurs GPS pour mesurer les déplacements en surface, des extensomètres et des inclinomètres implantés en puits pour détecter les mouvements en profondeur. La microsismicité est également examinée pour la zone Sud-Est de Moruroa. En complément des données TELSITE, des levés topographiques réalisés lors de campagnes spécifiques sur site apportent des mesures des déformations à une échelle plus globale. Les principaux résultats issus de la campagne menée en 2021 sont présentés. Enfin, une dernière partie dresse un bilan du système de surveillance TELSITE en termes de fonctionnement et de maintenance.

En 2021, l'activité microsismique de la zone Nord-Est de Moruroa reste très faible, tant en nombre d'évènements qu'en magnitudes, dans la continuité des années précédentes. La répartition de cette microsismicité au sein de la zone Nord-Est ne traduit pas d'évolution de la géométrie de ces zones depuis la fin des expérimentations nucléaires. En surface, avec la même tendance de ralentissement global progressif depuis 1996, les déplacements verticaux et horizontaux restent faibles en zone Nord-Est. Dans les zones Camélia et Hélène, les déplacements vers l'océan et la subsidence montrent la poursuite de mouvements à des vitesses globalement similaires à celles des années précédentes. En profondeur, les mesures continues montrent dans leur ensemble des déformations minimales en zone Nord-Est. Les résultats de la dernière campagne topographique périodique (2021) corroborent ces éléments.

Dans la zone Sud-Est, une très faible activité microsismique est reportée pour l'année 2021, dans la continuité des mesures précédemment acquises.

Depuis 1996, date de la fin des expérimentations sur l'atoll de Moruroa, le mouvement est en ralentissement et reste mesurable. Les vitesses estimées sont faibles et ne montrent pas de changement de tendance en 2021 par rapport au bilan géomécanique précédent. L'évolution peut être classée au niveau le plus faible de l'échelle des risques (Tableau 1), témoignant d'une situation normale.

2. La surveillance géomécanique de l'atoll de Moruroa

Après l'arrêt des expérimentations nucléaires françaises en 1996, et conformément aux recommandations de l'expertise menée par l'International Geomechanical Commission (IGC, présidée par le Pr Fairhurst) en 1999¹, la surveillance géomécanique des atolls a été poursuivie pour apprécier l'évolution des phénomènes de glissement en zone Nord-Est à Moruroa et veiller à la sécurité des personnes présentes sur l'atoll ou à Tureia. Cette surveillance comprend deux volets définis dans le guide de surveillance géomécanique des atolls de Moruroa et Fangataufa (édition 2008, mise à jour en 2018 suite à la mise en service opérationnel du nouveau système de surveillance) : le suivi continu d'indicateurs représentatifs de l'évolution du massif géologique de Moruroa et la réalisation périodique de campagnes d'observations topographiques sur les atolls de Moruroa et Fangataufa² offrant une vue plus globale de leur évolution. Cette surveillance géomécanique est confiée au CEA/DAM par le ministère des Armées via le Département de Suivi des Centres d'Expérimentations Nucléaires (DGA/DSCEN).

2.1. *Suivi continu de l'évolution de Moruroa*

2.1.1. **Système de surveillance TELSITE**

Le suivi continu s'applique à Moruroa où les effets des expérimentations ont été les plus importants. En effet, au nord-est de l'atoll, une déformation lente de la partie externe de l'atoll a été mise en évidence dès la fin des années 1970. Depuis, cette zone fait l'objet d'une surveillance instrumentée. Malgré l'arrêt des expérimentations et le net ralentissement du mouvement, ce suivi est maintenu.

La télésurveillance TELSITE, s'appuyant sur l'acquisition et la réception entièrement automatisées de mesures sur site, a été assurée par un précédent dispositif instrumental jusqu'en août 2018. Celui actuellement opérationnel est le fruit d'une rénovation complète. Il transmet en continu les mesures au CEA/DAM en métropole, par liaison satellite, et ne nécessite par conséquent aucun personnel spécialisé à Moruroa.

2.1.2. **Missions du système de télésurveillance**

La première mission de TELSITE est de couvrir le risque, dit « à 90 secondes », de déferlement très localisé d'une vague qui serait générée par l'effondrement soudain d'un pan de volume limité de falaise corallienne. Un tel effondrement s'accompagne de vibrations qui sont enregistrées par les capteurs sismiques installés sur le pourtour de l'atoll. Entre le moment où ces vibrations sont enregistrées et celui où une vague pourrait déferler sur le platier, il s'écoule au moins 90 secondes, temps durant lequel les personnes non protégées par le mur « océan » doivent se mettre à l'abri en hauteur ; le personnel situé en Zone Vie (protégée par les murs) est à l'abri de telles vagues. Dans une telle éventualité, le système TELSITE est conçu pour envoyer automatiquement une alerte en direction des personnes présentes sur site et parallèlement, vers les

¹ Commission Géomécanique Internationale, 1999. Underground nuclear testing in french Polynesia – Stability and Hydrology Issues – Chairman: Charles Fairhurst, Chairman. 784 pp.

² L'atoll de Fangataufa ne nécessite plus de surveillance continue depuis 1996. Une campagne d'observation périodique a été jugée suffisante par l'IGC.

personnels du CEA/DAM en métropole. Le personnel sur site doit alors appliquer les consignes de sécurité prescrites, jusqu'à ce que l'alerte ait été analysée, traitée et levée par les géophysiciens du CEA/DAM en métropole. Une simulation mensuelle permet de s'assurer du fonctionnement de l'ensemble de la chaîne d'alerte.

La deuxième mission du système de surveillance consiste à apprécier l'évolution géomécanique de l'atoll par les mesures des différents capteurs, analysées et interprétées en métropole. Si le diagnostic révèle une évolution anormale, des observations et analyses complémentaires sont prévues et des mesures de protection peuvent alors être prises.

Les signes avant-coureurs d'une éventuelle déstabilisation de grande ampleur, correspondant à un glissement d'une masse importante du massif en zone Nord à Moruroa, seraient repérés plusieurs semaines à plusieurs mois à l'avance grâce aux différents capteurs. L'atoll de Moruroa serait alors évacué préventivement. Dans l'hypothèse la plus pénalisante d'un glissement important, d'un volume de 670 millions de m³ de roches en zone Camélia (c'est-à-dire près de six fois le volume de carbonates déstabilisé lors de l'éboulement en zone Sud-Ouest de Moruroa qui a suivi l'expérience Tydée en juillet 1979), la vague générée pourrait atteindre 20 m de haut au droit de l'évènement. La Zone Vie serait partiellement submergée dans sa partie nord-ouest malgré la protection des murs. A plus longue distance, la propagation de la vague se ferait dans la direction nord-est, vers l'atoll de Tureia, situé à une centaine de kilomètres. Les calculs réalisés au CEA/DAM permettent de considérer qu'en cas d'arrivée du train de vague sur l'atoll de Tureia, les hauteurs de vagues au niveau de son littoral Nord seraient comprises entre 1 et 3 m et au niveau du littoral Sud pourraient submerger la couronne corallienne. L'ensemble des dispositions graduelles de sécurité a été consigné dans le Plan Communal de Sauvegarde (PCS) de la commune de Tureia en novembre 2012³. Ainsi, les dispositions de protection des personnes seraient prises bien avant l'occurrence du glissement.

L'ensemble des mesures réalisées est synthétisé, sur avis d'experts, sous la forme d'un indicateur global appelé vitesse relative (VR), quantité sans dimension permettant notamment de comparer la situation actuelle à la situation après l'arrêt définitif des expérimentations. Cet indicateur global, présenté plus en détail en annexe 2, est traduit en niveaux de risque, eux-mêmes associés à un délai de préavis vis-à-vis d'un événement de grande ampleur (Tableau 1).

³ Cf. Plan Communal de Sauvegarde de la commune de Fakarava et de Tureia, n°391/HC/CAB/DDPC du 20/11/2012.

Niveau de risque	Indicateur global "Vitesse Relative"	Situation et risque
Niveau 0	$VR < 2$	Situation normale.
Niveau 1	$2 < VR < 6$	Situation réversible*. Pas de risque immédiat.
Niveau 2	$6 < VR < 12$	Situation réversible*. Préavis supérieur à une semaine.
Niveau 3	$VR > 12$	Situation considérée comme irréversible. Préavis supérieur à 1 jour.

Tableau 1 : Niveaux de risque vis-à-vis d'un éboulement de grande ampleur.

* Le retour d'expérience des mesures effectuées à l'époque des expérimentations souterraines montre que pour des VR < 12, la situation est réversible.

2.2. Composantes du système de télésurveillance TELSITE

Comme l'illustre le schéma de principe en Figure 1, le système de surveillance continue automatique comporte :

- des capteurs sismiques implantés en profondeur et en surface, pour l'alerte à 90 secondes, mais aussi pour le suivi de la microsismicité ;
- des capteurs sismiques complémentaires en surface, dédiés au suivi de l'activité microsismique, d'une part, et permettant la mesure des forts mouvements le cas échéant (accéléromètres), d'autre part ;
- des stations GPS pour la mesure des déplacements en surface, certaines étant choisies comme stations de référence ;
- des câbles équipés de capteurs de déplacement (extensomètres) en forages inclinés latéraux (FIL) pour la mesure des déformations des flancs d'atoll ;
- des inclinomètres bi-composantes positionnés à différentes profondeurs le long d'un puits vertical pour la mesure du mouvement des couches géologiques successives ;
- des marégraphes pour mesurer l'amplitude d'éventuelles vagues qui résulteraient d'un éboulement sur les flancs de l'atoll.

Dans le Tableau 2 sont rappelés les composants du système TELSITE : les types de capteurs, les mesures qu'ils permettent d'effectuer et leurs nombres. Le Tableau 3 résume les caractéristiques (nomenclature, inclinaison et localisation) des six FIL accueillant les extensomètres.

La répartition géographique de l'instrumentation au sein de la zone Nord-Est de l'atoll est indiquée sur les Figures 2 et 3.

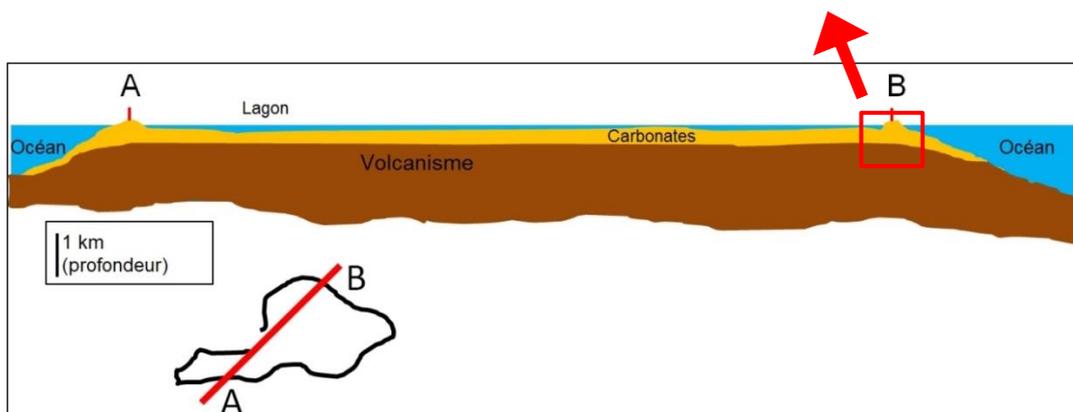
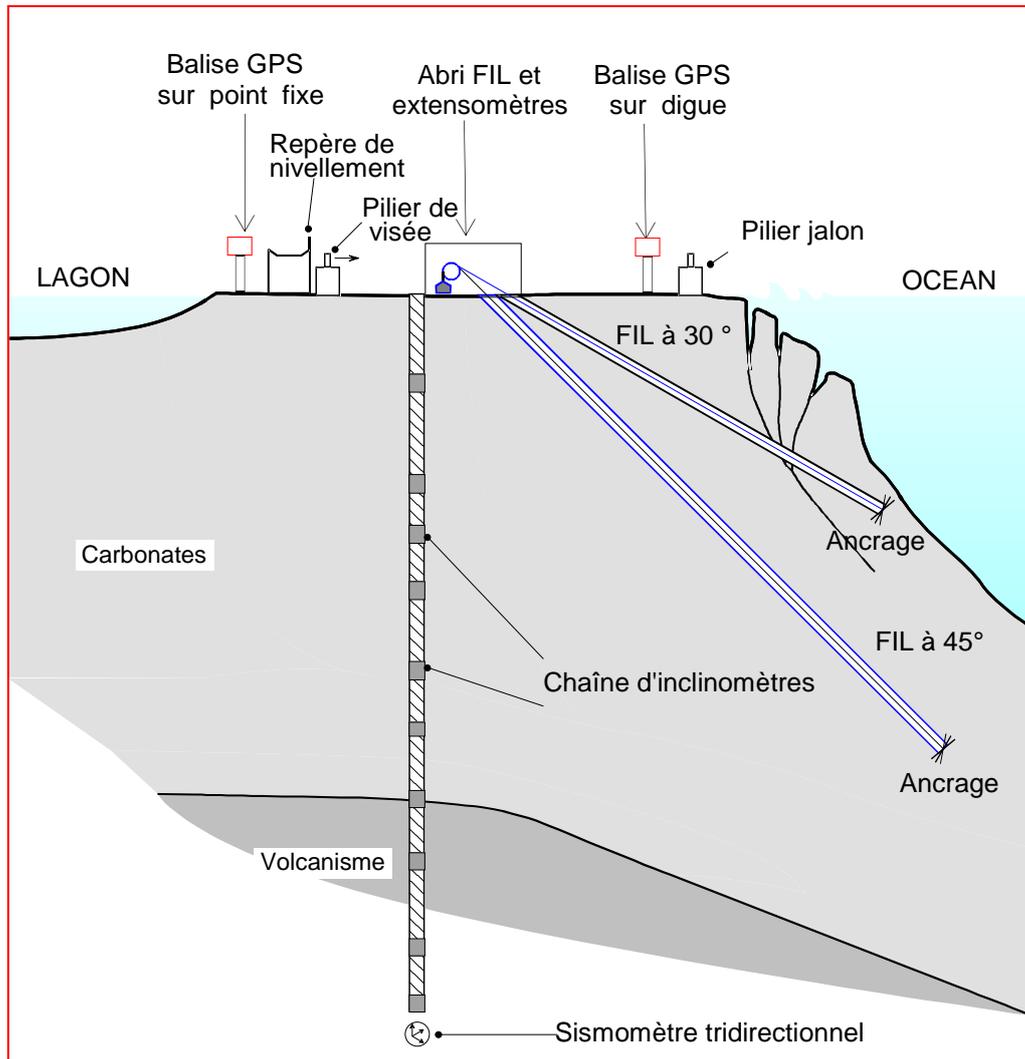


Figure 1 : Schéma de principe (en haut) des instrumentations du système de surveillance continue TELSITE. Cette coupe schématique représente les principaux types de mesures réalisées en zone Nord-Est à Moruroa (localisation sur la coupe du bas). Les déplacements en surface sont mesurés par les stations GPS. L'activité sismique est enregistrée par des sismomètres en profondeur et des 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.

Capteurs	Type de mesures	Nombre
Capteurs sismiques	Mesure continue de l'activité microsismique pour le risque à 90 secondes et pour le suivi de l'activité microsismique	Trois capteurs en profondeur en zones Irène, Hélène et Françoise Trois capteurs en surface en zones Dindon, Viviane et Simone
	Mesure complémentaire en surface de l'activité microsismique	Sept capteurs supplémentaires en surface
	Mesure des forts mouvements le cas échéant	Cinq accéléromètres en surface
GPS	Mesure des déplacements en surface	Dix stations en zone Nord
Extensomètres (FIL)	Mesure des mouvements sur les flancs de l'atoll	Un FIL à 30° et un FIL à 45° équipés en zones Irène, Hélène et Françoise
Inclinomètres	Mesure des déformations en profondeur	Une chaîne de capteurs implantés dans un puits en zone Hélène
Marégraphes	Mesure de la hauteur des vagues	Sept capteurs répartis sur l'atoll

Tableau 2 : Capteurs et mesures du système TELSITE.

Afin que le système soit à même d'assurer, à chaque instant, ses missions telles que décrites dans le guide de surveillance géomécanique des atolls de Moruroa et Fangataufa (version 2018), six stations sismiques sont installées (trois capteurs en profondeur en zones Irène, Hélène et Françoise et trois capteurs en surface en zones Dindon, Viviane et Simone), alors que seules cinq, dont deux en zone Nord, sont nécessaires pour assurer en permanence l'alerte à 90 secondes.

FIL	Inclinaison par rapport à l'horizontale	Point Kilométrique	Zone
5.30	30°	PK 5 N	Irène
5.45	45°		
7.30	30°	PK 7.5 N	Hélène
7.45	45°		
10.30	30°	PK 10 N	Françoise
10.45	45°		

Tableau 3 : Caractéristiques des forages inclinés latéraux (FIL) équipés d'extensomètres du système TELSITE.

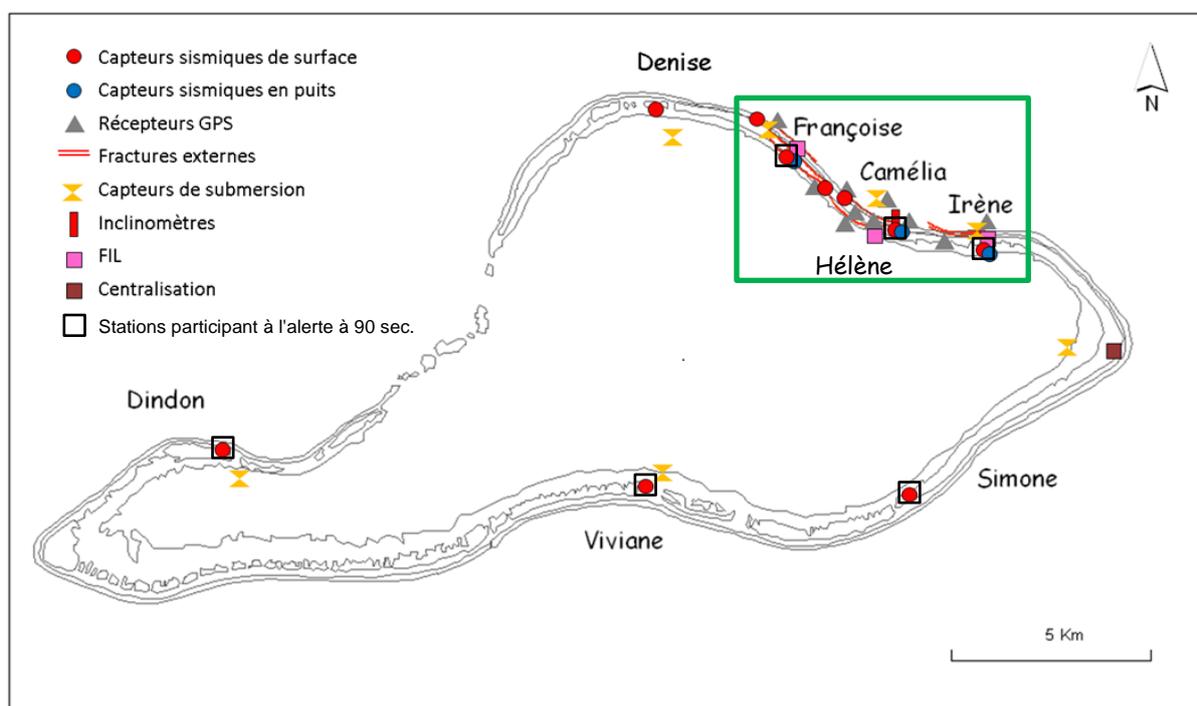


Figure 2 : Implantation de l'instrumentation du système TELSITE. L'encadré en vert est repris en détail dans la Figure 3 ci-dessous.

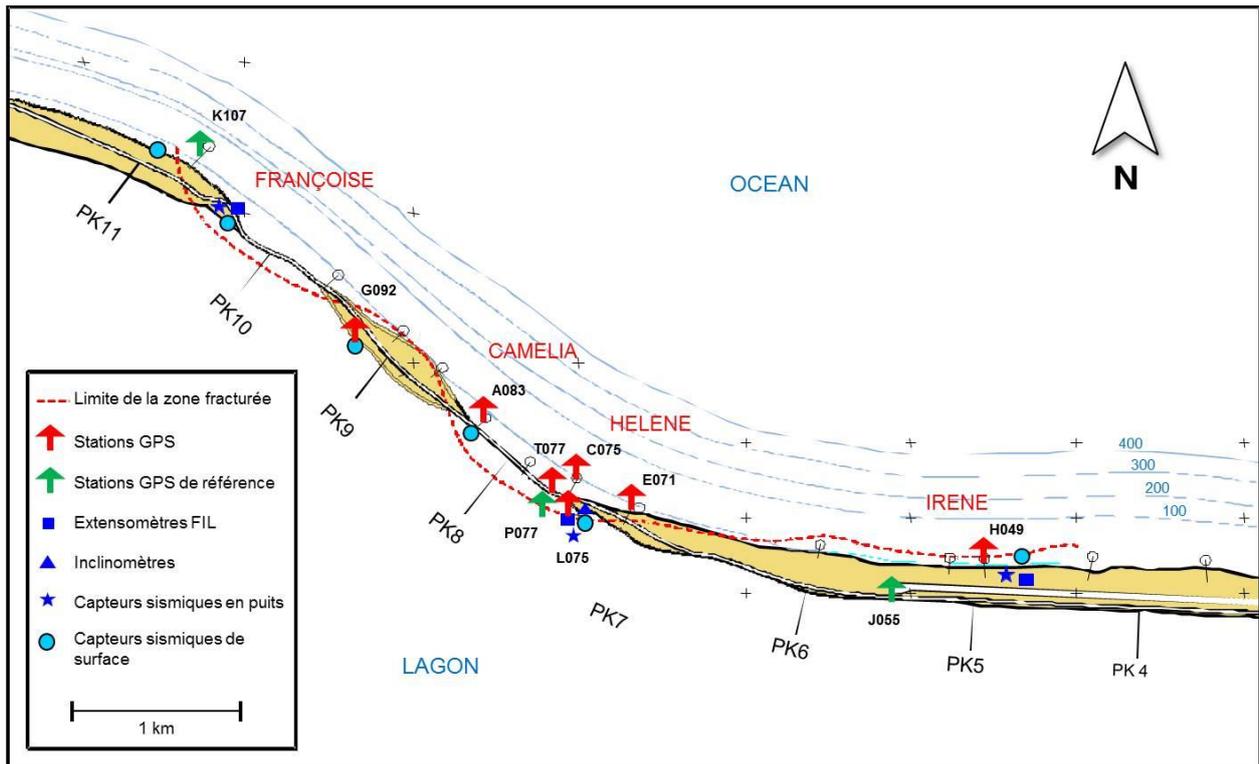


Figure 3 : Détail en zone Nord-Est de l'implantation de l'instrumentation du système TELSITE.

2.3. Campagnes complémentaires de caractérisation de l'évolution des atolls

Les données fournies par le système de télésurveillance sont complétées par des campagnes de levés topographiques dont la périodicité était de l'ordre de cinq à sept ans depuis la fin des expérimentations, et est maintenant de l'ordre de sept à dix ans (nouveau guide édition 2018), en raison des très faibles taux de déformation mesurés annuellement. Ces mesures concernent également l'atoll de Fangataufa.

La dernière campagne topographique a eu lieu du 27 octobre au 25 novembre 2021 à Moruroa et à Fangataufa. Ses principaux résultats sont reportés de façon synthétique dans ce document (§5).

3. Bilan de l'évolution de la zone Nord-Est mesurée en 2021

3.1. Sismicité

Les événements microsismiques détectés de manière automatique sont analysés en différé par les experts du CEA/DAM qui identifient et localisent ceux associés à des microséismes locaux. Les événements les plus couramment observés sont de type « relâchement de contraintes », terme désignant un séisme de très faible magnitude (microséisme), non ressenti, qui résulte de la libération soudaine et rapide des contraintes accumulées dans les masses de calcaires. D'autres types d'événements locaux peuvent également être détectés, comme des chutes de falaise de volume limité, des petits glissements de terrain ou des éboulements qui peuvent donner lieu à des signaux de plus longue durée et de formes plus complexes.

La répartition géographique des événements enregistrés en 2021 est tout d'abord présentée. La microsismicité est ensuite décrite au regard de son évolution temporelle depuis 1997, en termes de nombres d'événements, puis de magnitude et d'énergie libérée.

Un travail de fusion des données de microsismicité, réalisé en 2020, a permis l'élaboration d'une base de données, à présent unique, pour la période 1980-2020. Quarante-sept événements, comptabilisés deux fois, ont été mis en évidence sur un total de neuf cent quatre-vingt-huit. Leur suppression a conduit à quelques ajustements (non significatifs pour l'interprétation) du bilan des événements par secteur. Cette restructuration est à l'origine de modifications minimales entre les figures de microsismicité présentées avant et après sa mise en place en 2020.

3.1.1. Répartition spatiale de la sismicité

■ Répartition par secteurs géographiques

La répartition géographique des événements sismiques est représentée sur la Figure 4. Afin d'analyser la sismicité plus aisément, la zone Nord-Est de Moruroa est découpée en quatre secteurs (Figure 4) définis en cohérence avec la localisation de l'instrumentation de TELSITE (l'activité sismique étant de très faible amplitude, le niveau de détectabilité est en effet sensible à la position des capteurs ; ceux situés en profondeur présentent l'implantation la plus favorable car ils sont moins perturbés par le bruit microsismique généré en surface par le déferlement des vagues et la houle océanique) :

- le secteur Françoise est associé à la station en profondeur proche du PK10 ;
- le secteur Gisèle-Camélia inclut les PK8 et PK9 ;
- le secteur Camélia-Hélène, autour du PK7, inclut la station en profondeur de la zone Hélène ;
- le secteur Irène est associé à la station en profondeur proche de PK5.

Pris ensemble, les secteurs Gisèle-Camélia et Camélia-Hélène englobent la totalité de la zone considérée dans l'hypothèse de glissement la plus pénalisante en zone Camélia.

En 2021, 31 microséismes ont été détectés en zone Nord-Est par le système TELSITE (Figure 4, points rouges) : 10 en Françoise, 5 en Gisèle-Camélia, 4 en Camélia-Hélène et 12 en Irène. Aucun n'a entraîné le déclenchement de l'alerte.

Dans les §3.1.2 et §3.1.3, la microsismicité est également examinée en termes d'évolution temporelle et d'amplitude pour chacun de ces quatre secteurs.

■ Répartition en profondeur

Une partie des événements détectés par le passé⁴ a fait l'objet d'une analyse plus précise qui s'est traduite par quelques ajustements des localisations.

Pour chacun des quatre secteurs de la zone Nord-Est, i.e. Française, Gisèle-Camélia, Camélia-Hélène et Irène, une coupe verticale, perpendiculaire à la côte, sur laquelle sont projetés les événements proches, fournit une représentation de la sismicité en profondeur (Figure 5 à Figure 8). Contrairement à la vue cartographique, les quatre profils obtenus n'ont pas pour objet de montrer l'ensemble de la sismicité de la zone Nord-Est. La morphologie de l'atoll n'étant pas rectiligne, projeter sur un même plan des événements trop éloignés ne serait pas pertinent. Ainsi, pour chaque coupe, seuls les événements suffisamment proches sont inclus, l'emprise est néanmoins large de 1,5 km.

La répartition en profondeur de la sismicité mesurée au cours de l'année 2021 (Figure 5 à Figure 8) montre, comme par le passé, que l'ensemble des événements⁵ reste confiné à l'intérieur ou le long des limites hypothétiques des trois masses superficielles carbonatées en mouvement identifiées en zones Française (PK10), Camélia (PK8) et Irène (PK5). Tous les événements détectés en 2021 ont en effet des profondeurs inférieures à 400 mètres et, comme détaillé dans le §3.1.2, ils sont de très faible magnitude.

Sur la coupe du secteur Française (Figure 5), les deux événements de plus forte magnitude ayant déclenché les alertes de fin 2006 (représentés par les étoiles n° 2 et 4) sont localisés à l'interface entre les carbonates (à la base des calcaires crayeux) et le volcanisme. Aucun foyer sismique n'est enregistré plus en profondeur dans le volcanisme.

En carte (Figure 4) comme en coupe (Figure 7), le secteur Camélia-Hélène présente la microsismicité la plus faible sur la totalité de la période de mesure et une proportion d'événements détectés depuis 2018 qui semble plus importante ; ce point est discuté plus loin (§3.1.2).

En 2021, 31 microséismes ont été détectés en zone Nord-Est, aucun n'a déclenché d'alerte. Les mesures sismiques enregistrées depuis 2006 ne traduisent pas de modification des emprises ou des volumes potentiels de glissement par rapport aux années antérieures. Depuis la fin des expérimentations nucléaires, la localisation de la sismicité en zone Nord-Est à Moruroa reste inchangée au cours du temps et ne suggère pas d'évolution particulière en profondeur dans ce secteur de l'atoll.

⁴ Les localisations des événements de 2000 et 2003, ainsi que celles de la période de janvier à avril 2004 ont été révisées en 2005 et 2008.

⁵ Les localisations de quelques événements ont été ré-analysées en 2016, ce qui explique les modifications dans la représentation des événements par rapport aux bilans antérieurs.

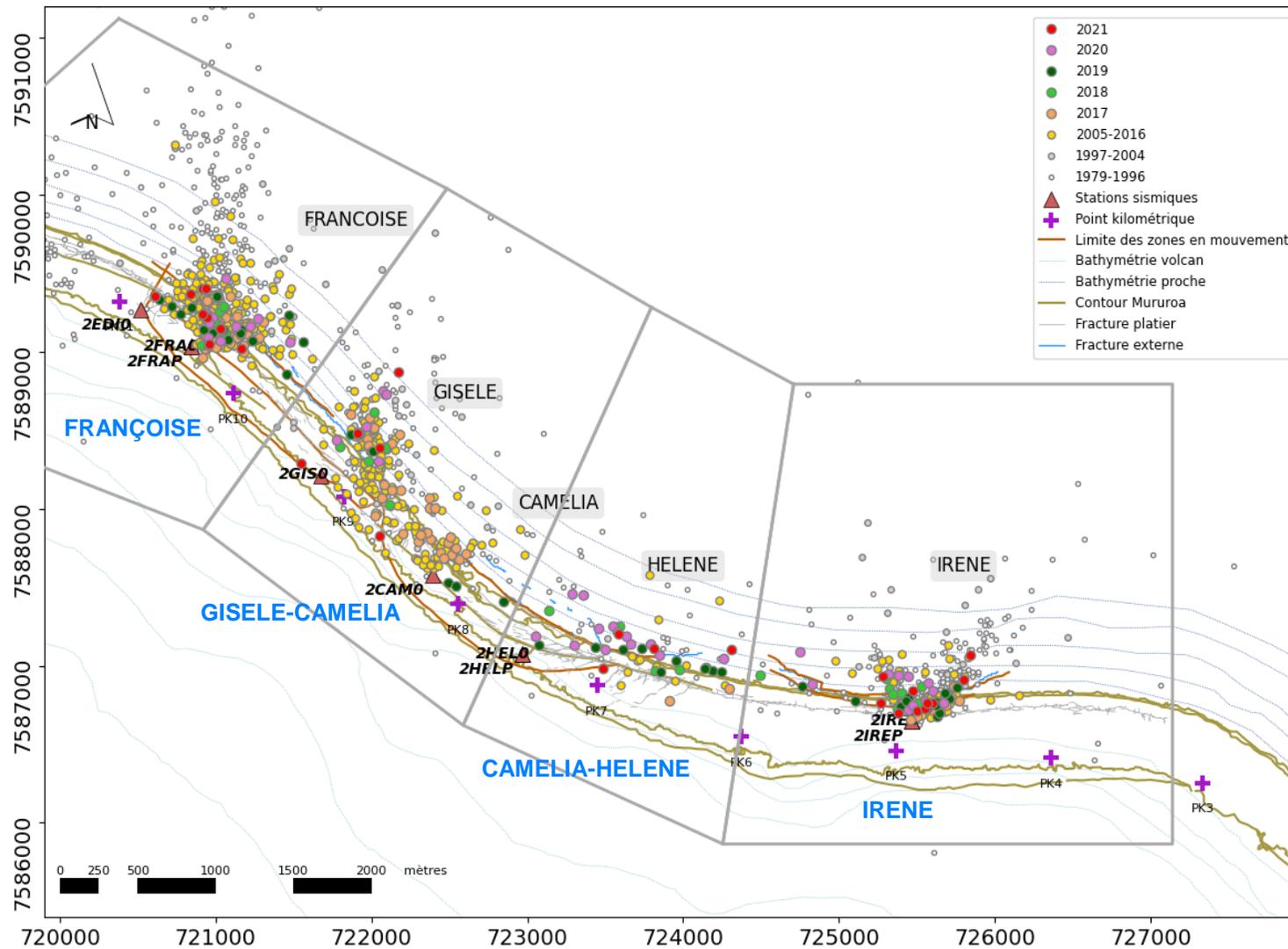


Figure 4 : Historique de la répartition spatiale de la microsismicité en zone Nord-Est (cercles colorés par période) et stations sismiques de TELSITE (triangles) utilisées dans le processus de localisation. Les quatre secteurs (polygones gris) définis pour l'analyse de la sismicité sont notés en bleu.

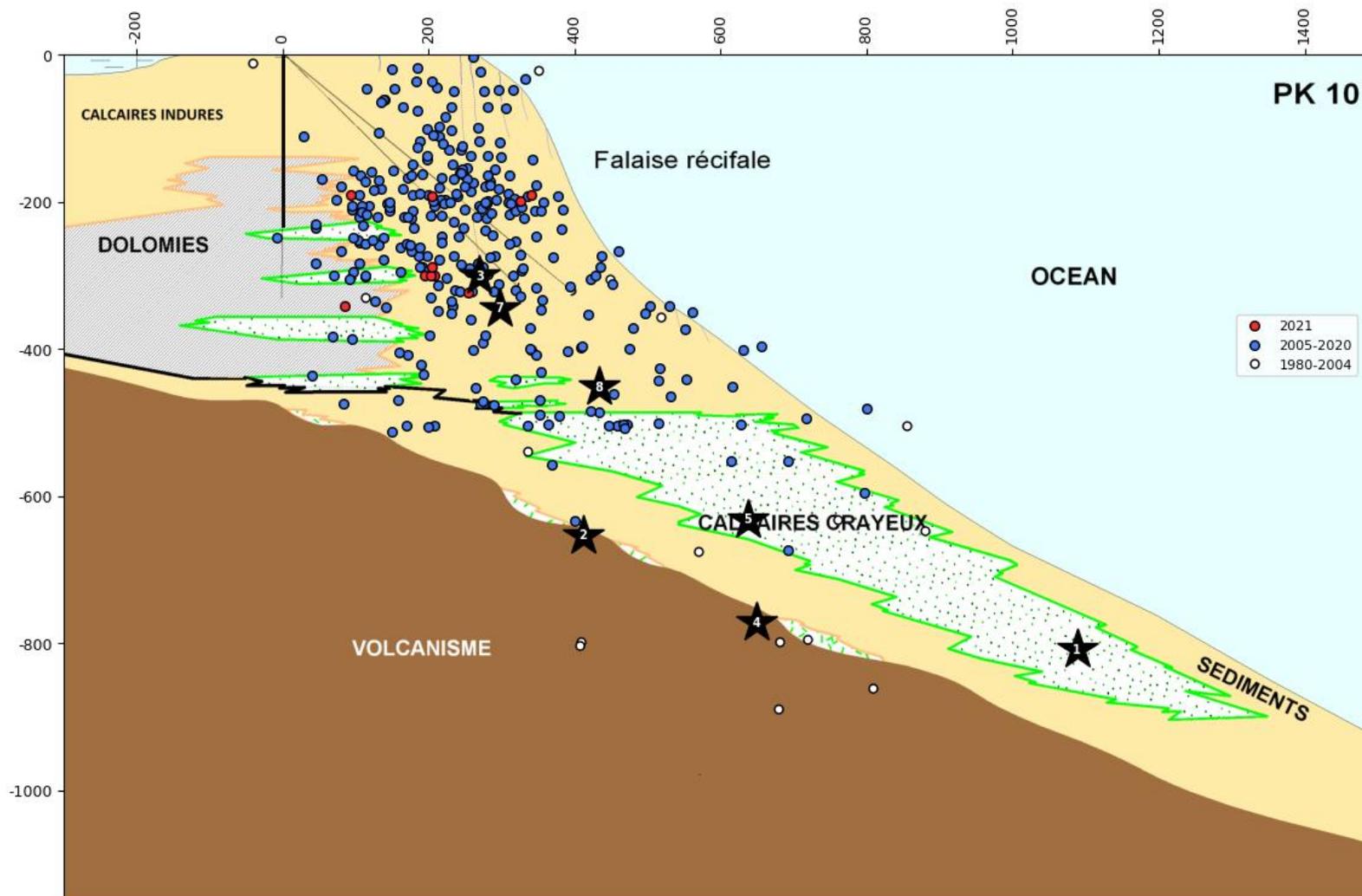


Figure 5 : Projection sur une coupe géologique traversant le secteur Française des hypocentres enregistrés de 2005 à décembre 2021 (cercles colorés par période). Les étoiles noires indiquent les événements ayant déclenché des alertes (1 : 01/04/2003, 2 : 27/11/2006, 3 : 29/11/2006, 4 : 02/10/2006, 5 : 12/01/2007, 7 : 15/09/2009, 8 : 19/09/2009). Le puits vertical de l'instrumentation de TELSITE est indiqué par le trait noir vertical.

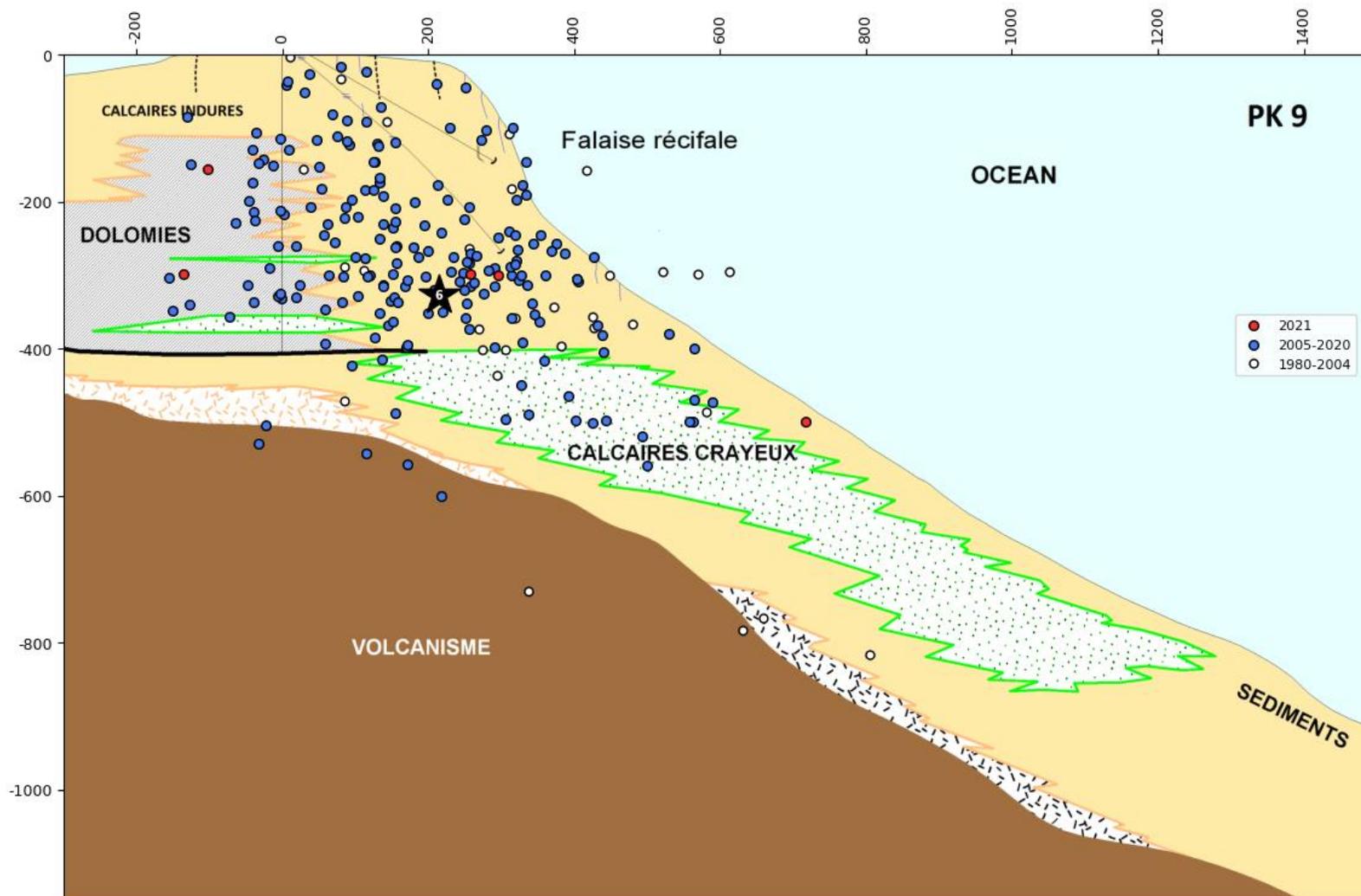


Figure 6 : Projection sur une coupe géologique traversant le secteur Gisèle-Camélia des hypocentres enregistrés de 2005 à décembre 2021 (cercles colorés par période). L'étoile noire indique l'évènement ayant déclenché une alerte (le 11/10/2007).

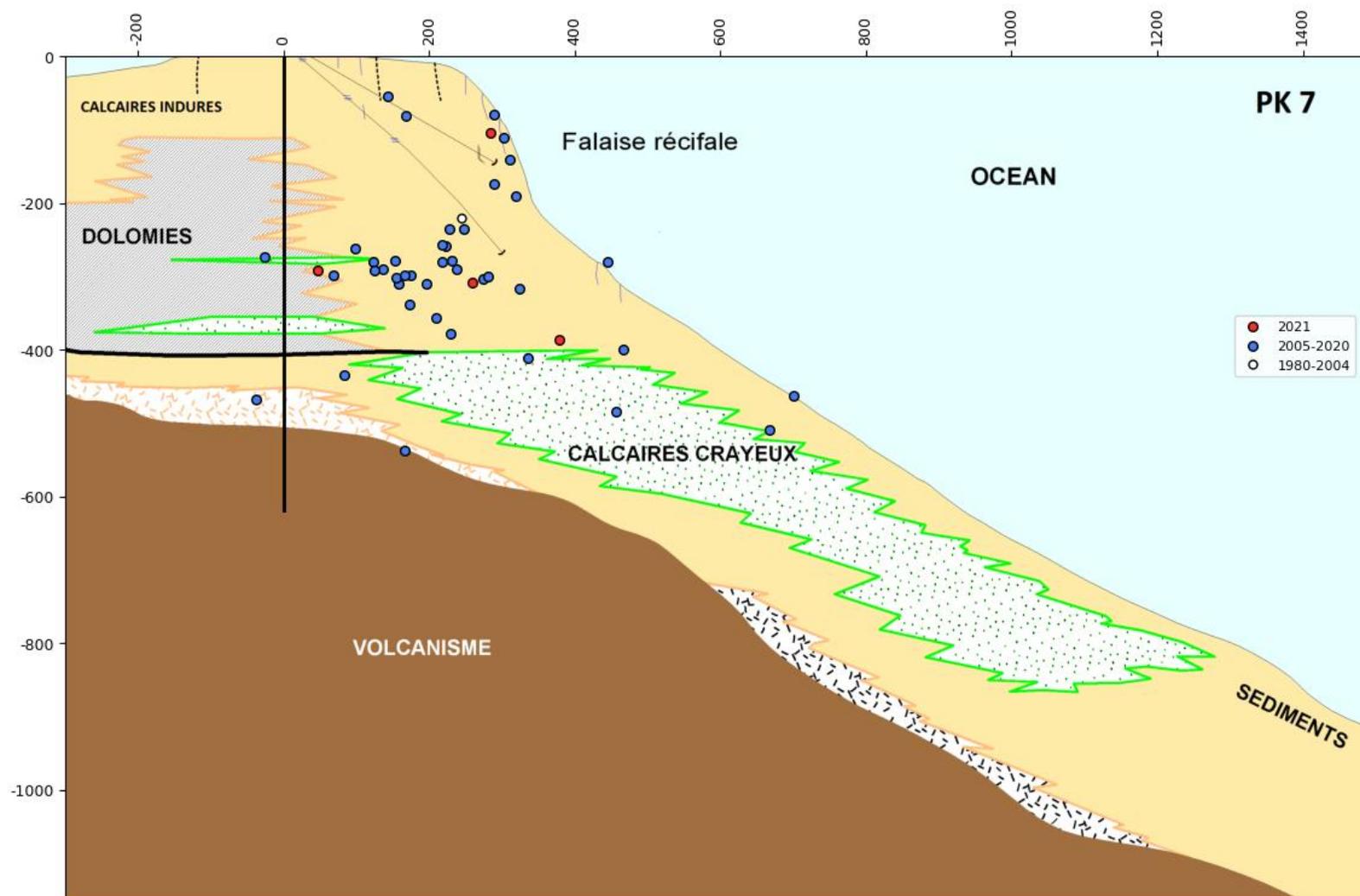


Figure 7 : Projection sur une coupe géologique traversant le secteur Camélia-Hélène des hypocentres enregistrés de 2005 à décembre 2021 (cercles colorés par période). Le puits vertical de l'instrumentation de TELSITE est indiqué par le trait noir vertical.

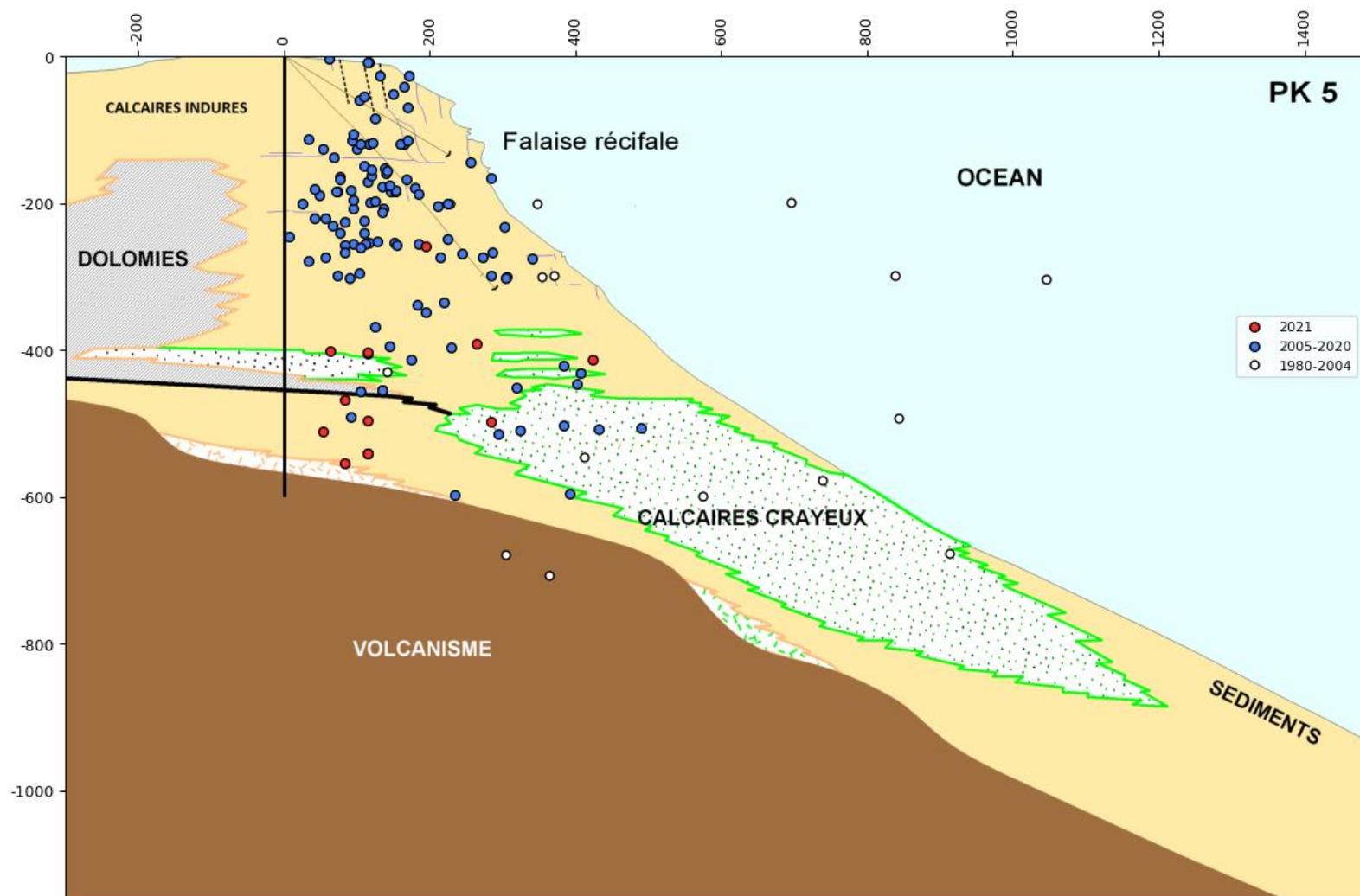


Figure 8 : Projection sur une coupe géologique traversant le secteur Irène des hypocentres enregistrés de 2005 à décembre 2021 (cercles colorés par période). Le puits vertical de l'instrumentation de TELSITE est indiqué par le trait noir vertical.

3.1.2. Evolution temporelle de l'activité sismique

Les 31 microséismes détectés en 2021 représentent une moyenne de 0,60 évènement par semaine pour l'ensemble de la zone Nord-Est (Figure 9). Ce taux de sismicité est inférieur à celui d'un par semaine considéré comme représentatif d'une activité normale (Tableau 6). Il reflète une très faible microsismicité dans toute la zone Nord-Est comme le montrent, pour chaque secteur, l'évolution temporelle (Figure 9) et les courbes des nombres d'évènements cumulés (Figure 10) :

- Dans le secteur Françoise, après une hausse en 2017, l'activité microsismique a diminué, elle reste faible en 2021 avec dix évènements détectés.
- Le taux de microsismicité du secteur Gisèle-Camélia est, depuis 2018, à un niveau très faible avec cinq évènements enregistrés en 2021.
- Avant 2018, très peu d'évènements, moins de cinq par an, parfois aucun, avaient été enregistrés dans le secteur Camélia-Hélène. Depuis 2018, l'activité, bien que toujours très faible, semble plus importante. Les analyses ont rendu compte de treize microséismes en 2020 et seulement quatre en 2021. Ces valeurs reflètent vraisemblablement une meilleure détectabilité dans ce secteur apportée par la station de profondeur en zone Hélène, nouvellement implantée lors de la mise en place du système TELSITE actuel. Pour une activité sismique de très faible amplitude, le niveau de détectabilité est en effet très sensible à la géométrie du réseau de stations.
- Dans le secteur Irène, l'activité microsismique détectée reste stable (la pente du nombre d'évènements cumulés varie peu depuis fin 2013) et faible, avec douze évènements détectés en 2021.

Comme indiqué précédemment (§3.1.1), pris ensemble, les secteurs Gisèle-Camélia et Camélia-Hélène englobent la masse la plus pénalisante considérée dans l'hypothèse de glissement en zone Camélia. A titre informatif, la contribution conjointe de ces deux secteurs est représentée sur la figure des nombres cumulés d'évènements (Figure 10, courbe Camélia "étendue").

En 2021, le taux de microsismicité est très faible dans tous les secteurs de la zone Nord-Est ; il est en moyenne de 0,60 évènement par semaine.

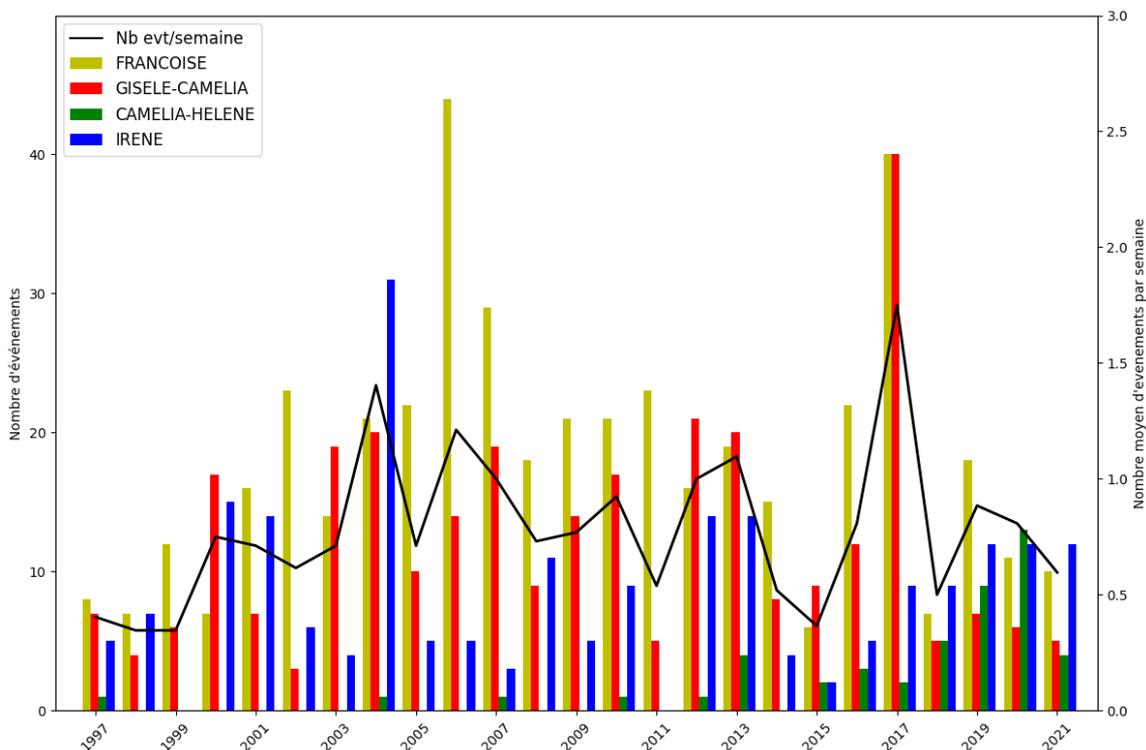


Figure 9 : Evolution temporelle de l'activité microsismique annuelle de 1997 à 2021 pour chacun des secteurs de la zone Nord-Est associés au système TELSITE (barres, axe de gauche) et nombre moyen annuel d'événements par semaine pour l'ensemble du secteur Nord-Est (courbe noire, axe de droite).

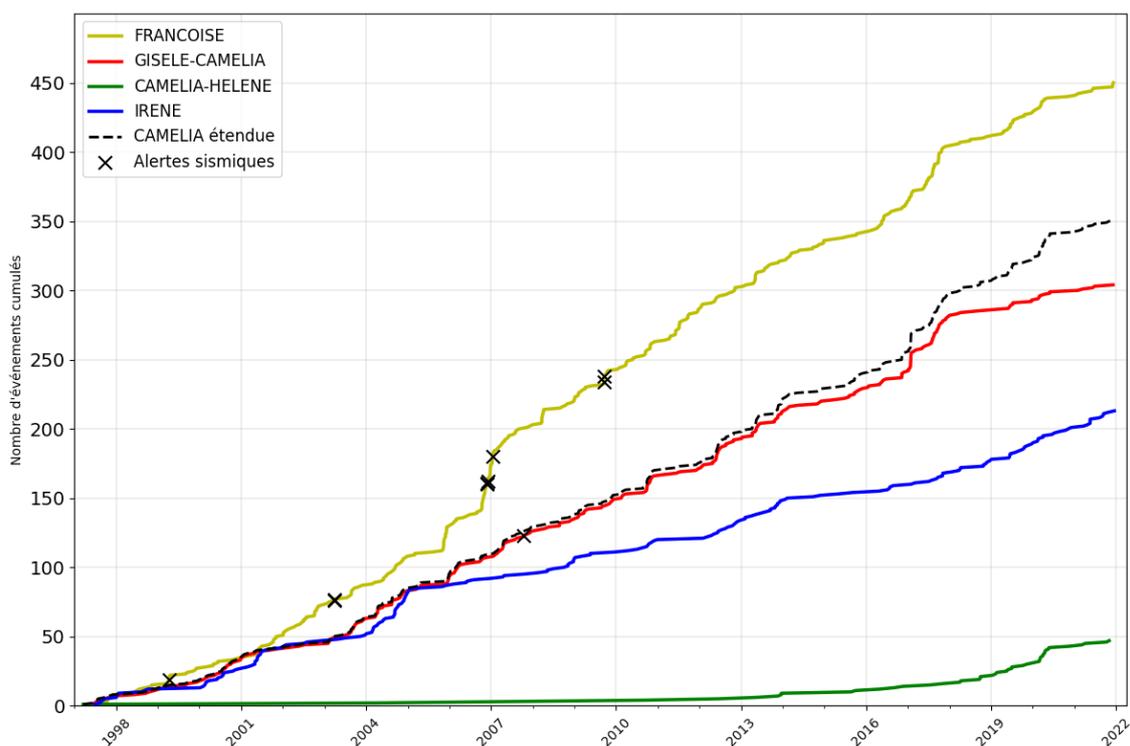


Figure 10 : Courbes du nombre d'événements cumulés de 1997 à 2021 pour chacun des secteurs de la zone Nord-Est. La courbe noire pointillée (Camélia "étendue") représente la somme des contributions des courbes rouge (Gisèle-Camélia) et verte (Camélia-Hélène). Les croix et la courbe sur laquelle elles sont reportées indiquent les dates des microséismes ayant déclenché des alertes et la zone concernée.

3.1.3. Répartition des amplitudes des évènements sismiques et analyse en termes d'énergie cumulée

Les magnitudes dites locales, M_L , des évènements sont calculées à l'aide de l'expression déterminée pour l'atoll de Rangiroa sur la base du catalogue de sismicité polynésien :

$$M_L = \log(A) - 3,35$$

où A désigne l'amplitude maximale en nm/s mesurée sur la composante verticale des signaux.

Cette formule ne comporte pas de terme d'atténuation dépendant de la distance car elle est utilisée pour de très faibles distances, quelques kilomètres au plus. Un terme d'atténuation classique s'appliquerait pour des distances supérieures à quelques dizaines de kilomètres environ.

Ainsi, la magnitude locale évaluée ici ne dépend que de l'amplitude maximale. A Moruroa, les évènements sismiques étant également en champ très proche, cette formule est applicable. Elle permet d'examiner la distribution temporelle des niveaux de magnitude de la microsismicité sur toute la période d'enregistrement par le système TELSITE.

La gamme de magnitudes M_L des évènements détectés par les systèmes de surveillance de l'atoll depuis 1997 s'échelonne entre -2 et 2,3 pour la zone Nord-Est (Figure 11).

En 2021, aucun n'a déclenché d'alerte. Quatre évènements parmi les plus forts enregistrés cette année ont eu lieu dans le secteur Française au cours d'une même période entre le 30 novembre et 9 décembre. Leurs localisations au sein de la zone principale de microsismicité (Figure 5), centrée sur des profondeurs de 200 à 300 mètres, suggèrent qu'ils font partie d'une même séquence. Leurs magnitudes sont comprises entre 0,52 et 1,35. La plus forte valeur a été obtenue par l'évènement du 2 décembre 2021 qui a conduit au dépassement d'un seuil individuel d'alarme en amplitude pour deux stations uniquement.

Sur l'ensemble de la période 1997-2021 (Figure 12, barres bleues), plus de 97% des évènements ont des magnitudes M_L inférieures ou égales à 1.

En 2021 (Figure 12, barres vertes), tous les évènements sauf un, soit près de 97%, sont de magnitude inférieure à 1. 71% d'entre eux sont de magnitude inférieure ou égale à 0. Les quelques 3% obtenus pour les magnitudes entre 1 et 1,5 correspondent au seul relâchement de contraintes du 2 décembre 2021 à 300 m de profondeur en zone Française et de magnitude 1,35.

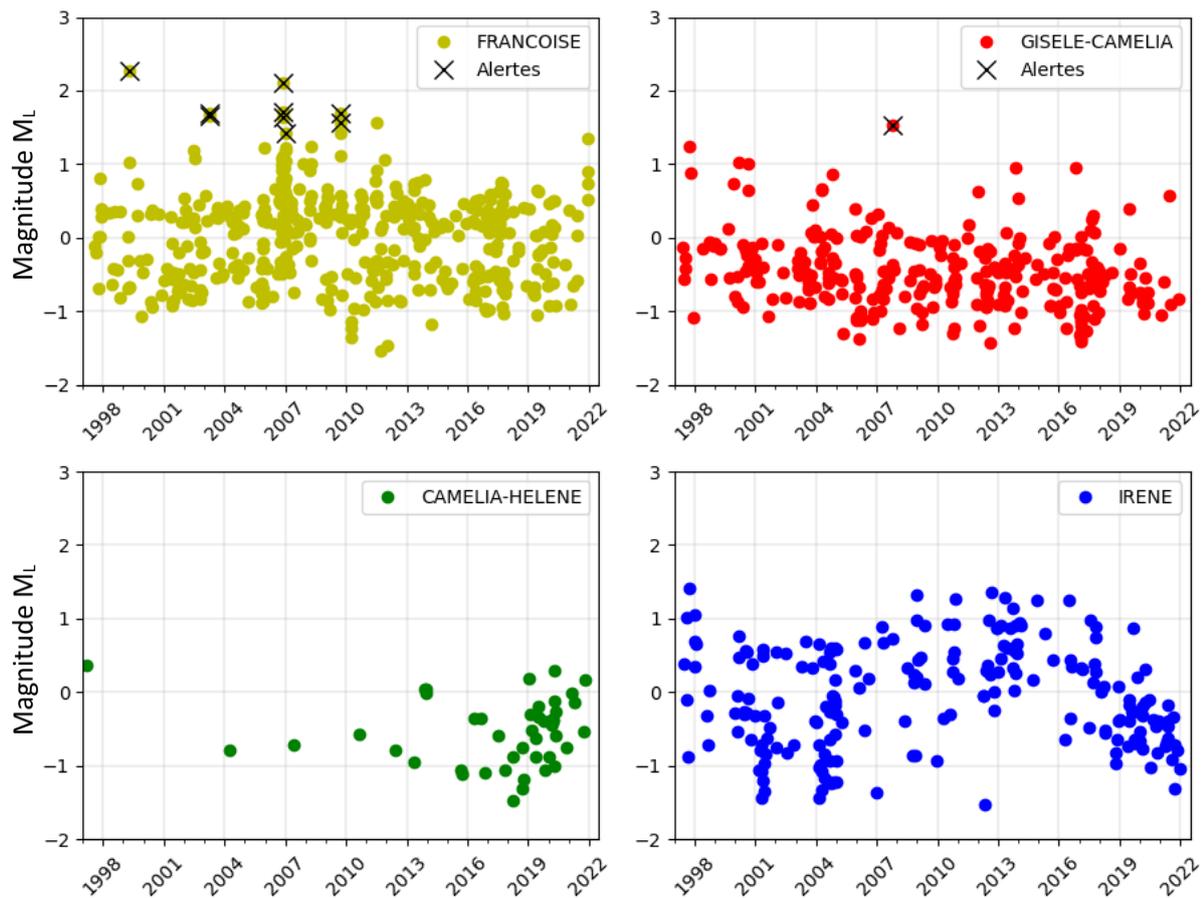


Figure 11 : Distribution temporelle des magnitudes M_L de 1997 à 2021 pour les secteurs François, Irène, Gisèle-Camélia et Camélia-Hélène.

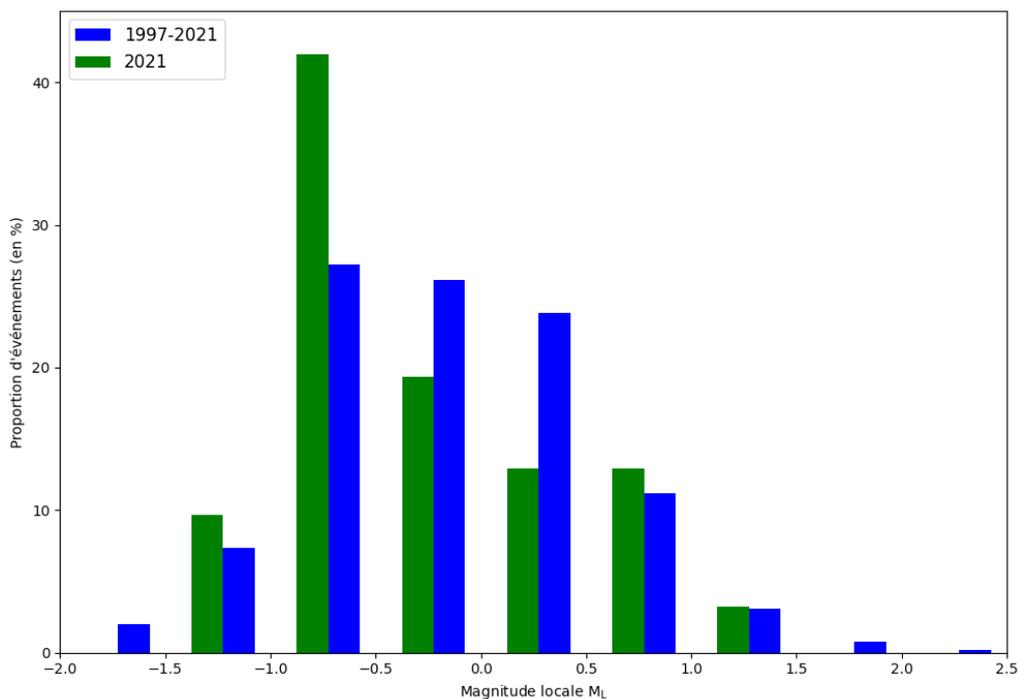


Figure 12 : Distribution de la proportion de relâchements de contraintes, en pourcentage, détectés en zone Nord-Est en fonction de leur magnitude locale M_L sur la période 1997-2021 (en bleu) et sur l'année 2021 (en vert).

Une analyse en termes d'énergie cumulée permet de mettre plus nettement en évidence la contribution des événements de plus forte magnitude au cours du temps. Pour cela, les contributions de chaque événement sismique sont additionnées aux précédentes au cours du temps pour chacun des quatre secteurs de la zone Nord-Est. L'énergie sismique libérée par un événement sismique est donnée par la relation :

$$E = 5 \cdot 10^{-5} M_0 \quad (\text{Kanamori, 1977}) \quad (1)$$

où E est l'énergie en erg et M_0 le moment sismique en dyne-cm, déduit de la relation :

$$\log_{10}(M_0) = 16,3 + 1,39 M_L \quad (\text{Thatcher et Hanks, 1973}) \quad (2)$$

Cette approche est présentée plus en détail en annexe 1.

La relation (2) conduit à des estimations de moment sismique comprises entre $2,9 \cdot 10^{14}$ et $1,5 \cdot 10^{18}$ dyn-cm (soit entre $2,9 \cdot 10^7$ et $1,5 \cdot 10^{11}$ N·m) en 2021. Cette dernière valeur correspond au seul événement de magnitude 1,35 dans le secteur Française. Tous les autres moments sont au moins d'un ordre de grandeur inférieur.

Les courbes d'énergie cumulée au cours du temps (Figure 13 et Figure 14) montrent des niveaux différents selon les secteurs et une évolution par plateau. Les sauts les plus marqués sont produits par les événements de plus forte magnitude, tandis que ceux de faible magnitude (i.e. inférieure à 1) ne libèrent que peu d'énergie et n'engendrent qu'au plus de petites discontinuités sur les courbes :

- Pour le secteur Française, l'énergie cumulée depuis 1997 est de $5,4 \cdot 10^{15}$ ergs (Figure 13, courbe orange). Cette valeur, la plus importante de la zone Nord-Est, est cependant très faible. Les événements ayant donné lieu à des alertes en 1999, 2003, 2006 et 2009 sont à l'origine des discontinuités majeures de la courbe d'énergie cumulée au cours du temps. De 2011 à 2020, hormis une légère hausse en 2017, l'évolution est régulière, en lien avec une activité sismique faible tant en nombre d'événements qu'en magnitude. L'énergie libérée en 2021, en hausse par rapport à 2020, est de $1,1 \cdot 10^{14}$ ergs. Elle correspond essentiellement à la contribution de la séquence des quatre événements en fin d'année, et plus principalement celui de magnitude 1,35.
- Pour le secteur Irène, le bilan énergétique cumulé depuis 1997 est de $1,2 \cdot 10^{15}$ ergs (Figure 13, courbe bleue), soit une valeur 4 à 5 fois inférieure à celle de Française. Alors que de 2009 à 2016, des événements de magnitude M_L supérieure à 1 avaient été enregistrés régulièrement, aucun n'a été détecté depuis 2017. Pour l'année 2021, toutes les magnitudes sont inférieures à 0 et l'activité microsismique représente une libération d'énergie de $2,0 \cdot 10^{12}$ ergs.
- Pour le secteur Gisèle-Camélia, l'énergie libérée depuis 1997 reste faible (Figure 13, courbe verte), elle est de $4,8 \cdot 10^{14}$ ergs, soit plus de dix fois inférieure à celle de Française. Le bilan énergétique pour 2021 est de $6,7 \cdot 10^{12}$ ergs.
- Pour le secteur Camélia-Hélène, le bilan énergétique depuis 1997, de $2,1 \cdot 10^{13}$ ergs, est le plus faible de la zone Nord-Est (Figure 13, courbe rouge), de deux ordres de grandeur inférieur à celui du secteur Française. L'énergie libérée en 2021 est de $2,5 \cdot 10^{12}$ ergs.

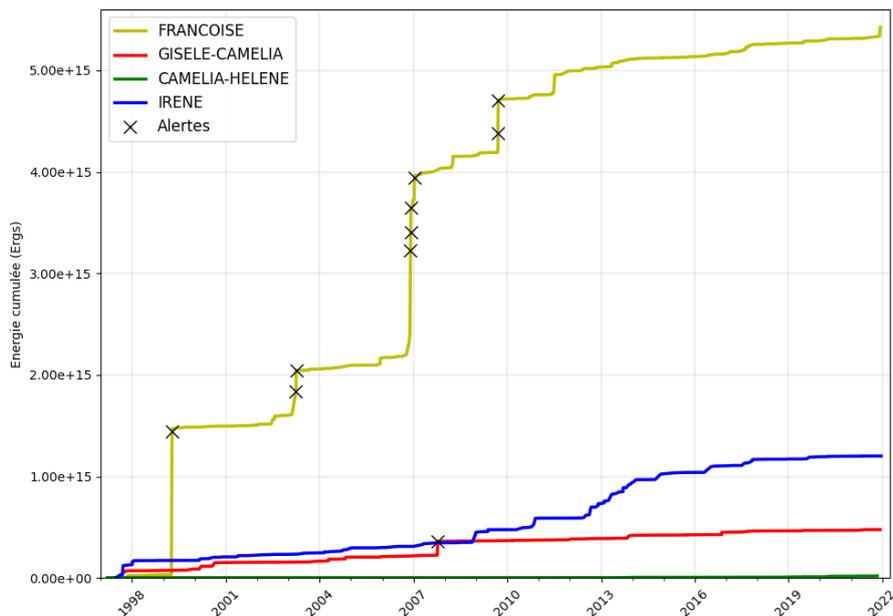


Figure 13 : Comparaison des énergies cumulées de 1997 à fin 2021 pour les quatre secteurs de la zone Nord-Est : Française (en jaune), Irène (en bleu), Gisèle-Camélia (en rouge) et Camélia-Hélène (en vert). Les croix et la courbe sur laquelle elles sont reportées indiquent les dates des microséismes ayant déclenché des alertes et la zone concernée.

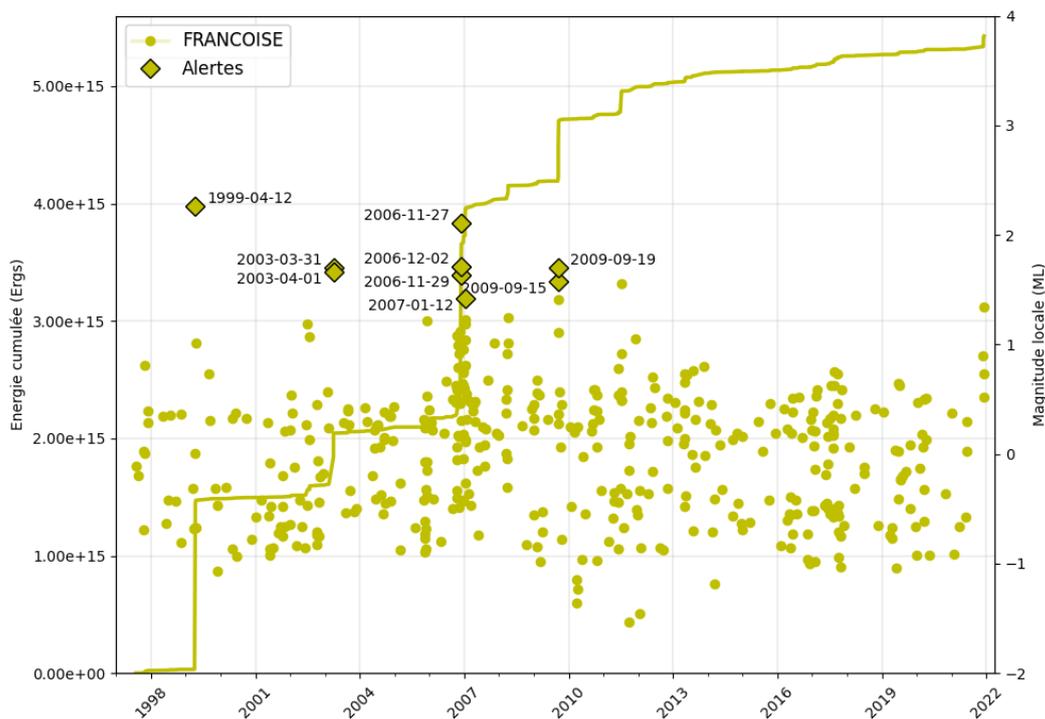


Figure 14 : Energies cumulées (courbes, axe des ordonnées de gauche) pour les évènements de 1997 à fin 2021 et magnitudes M_L associées (cercles, axe des ordonnées de droite) de la zone Française. Les losanges étiquetés représentent les évènements ayant déclenché des alertes.

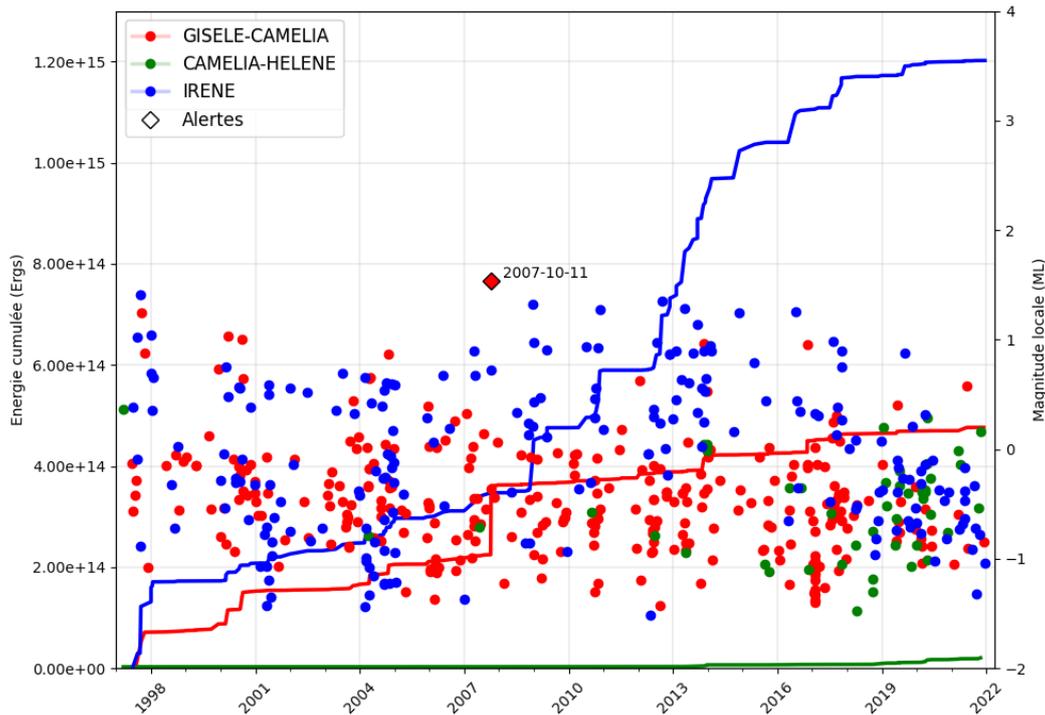


Figure 15 : Energies cumulées (courbes, axe des ordonnées de gauche) pour les évènements de 1997 à fin 2021 et magnitudes M_L associées (cercles, axe des ordonnées de droite) des zones Irène (en bleu), Gisèle-Camélia (en rouge) et Camélia-Hélène (en vert). Le losange étiqueté représente l'évènement ayant déclenché une alerte en zone Gisèle-Camélia.

Pour l'année 2021, le bilan énergétique, dans les quatre secteurs de la zone Nord-Est, traduit le très faible niveau de magnitude des évènements enregistrés. L'énergie libérée par ceux du secteur Française reste la plus importante en 2021. Elle est principalement due à une séquence de quatre évènements en fin d'année, aucun n'ayant déclenché d'alerte. Les énergies cumulées des évènements des secteurs Irène et Camélia-Hélène sont environ cinquante fois plus faibles, celle du secteur Gisèle-Camélia environ quinze fois.

3.2. Déplacements et déformations en surface

Le réseau GPS du système TELSITE fournit une mesure en continu des déplacements en surface : ceux-ci sont obtenus par le calcul des mouvements relatifs entre les stations GPS prises deux à deux, appelées lignes de base. Les mesures représentent ainsi des mouvements par rapport à une station considérée comme fixe.

3.2.1. Le réseau GPS de TELSITE

Le système TELSITE comporte dix stations GPS (Figure 16), leur nom fait référence aux PK où elles sont installées :

- **H049** en bout de digue Hotel côté océan ;
- **J055** sur le platier côté lagon, dans un secteur stable, à l'extrémité occidentale de la piste ;
- **E071** en bout de digue Echo côté océan ;

- **L075** sur l'abri FIL de la plate-forme Hélène côté lagon ;
- **C075** en bout de digue Charlie-Delta côté océan ;
- **T077** en bord de route ;
- **P077** sur la digue D77N côté lagon ;
- **A083** sur le toit d'un abri en zone Camélia ;
- **G092** en zone Gisèle côté lagon ;
- **K107** en bout de digue Kilo côté océan.



Figure 16 : Localisation des dix stations GPS du système TELSITE actuel (fond de carte extrait de Google Maps). Cinq stations marquées par un astérisque ont une station équivalente dans le système précédent : J055, H049, C075, A083 et K107 ont respectivement remplacé JEANNE, HOTEL, GPS1, ALPHA et KILO.

3.2.2. Estimation des déplacements en surface à partir des données GPS

Les déformations en surface sont estimées en calculant les mouvements relatifs entre deux stations. Ainsi, l'évolution au cours du temps de la ligne de base J055-A083, par exemple, permet d'évaluer le déplacement d'A083 par rapport à J055 considérée comme fixe. Les vitesses des déformations sont déduites des pentes des séries temporelles pour les trois composantes du déplacement (Est, Nord et verticale) des lignes de base considérées.

Il faut cependant noter que les déformations mesurées sont en fait la somme de deux termes : une déformation permanente, véritable objet de la surveillance mise en place, et une variation saisonnière, transitoire, à l'origine de signaux cycliques. Ces variations se superposent aux déformations permanentes entravant l'estimation de leur vitesse, d'autant plus lorsque, comme au sein de la zone Nord-Est de Moruroa, les déplacements

examinés sont faibles. Blewitt et Lavallée (2002)⁶ ont montré que le biais sur l'estimation des vitesses engendré par les termes saisonniers devenait négligeable pour des mesures sur plus de 4,5 ans et qu'il pouvait être très important pour des enregistrements d'une durée inférieure à 2,5 ans. Les mesures GPS du système TELSITE actuel, à présent disponibles pour une période de 3,3 ans, sont encore trop courtes pour s'affranchir de tout biais lié aux variations saisonnières. L'interprétation en termes de direction et de vitesse des déplacements proposée ci-après doit être considérée avec prudence. Les estimations des déformations permanentes seront ajustées et précisées lorsque des séries temporelles obtenues sur une durée plus importante pallieront les effets des variations saisonnières.

3.2.3. Déformations de la zone Nord-Est mesurées en surface

Avant la mise en place du système TELSITE actuel, les déplacements en surface étaient examinés à partir des enregistrements d'un plus petit nombre de stations GPS. Ils étaient estimés par rapport à la station JEANNE, équivalente de la station J055 actuelle, située sur le platier côté lagon en zone stable (Figure 16).

Les mesures de ces capteurs acquises jusqu'en août 2018 ont permis de caractériser différents mouvements par rapport à JEANNE au sein de la zone Nord-Est :

- Depuis 1990, la station GPS1, située en zone Hélène, équivalente de C075 sur la digue Charlie-Delta mais un peu plus proche de la côte, montrait un déplacement, globalement en ralentissement, avec, pour la période 2015-2018, une composante vers le nord de l'ordre de 0,26 mm/mois et une subsidence de -0,20 mm/mois. Aucun déplacement est-ouest significatif n'était détecté.
- La station ALPHA, équivalente d'A083 en zone Camélia, montrait un mouvement lent et stable vers l'est-nord-est avec une composante en subsidence. De 2016 à août 2018, les vitesses vers le nord, vers l'est et verticale étaient respectivement de l'ordre de 0,04, 0,25 et -0,19 mm/mois.
- La station KILO, équivalente de K107, située en zone Française, montrait un mouvement faible, avec une composante vers l'est et une composante en subsidence, non quantifiable en raison de fortes perturbations saisonnières et des répercussions d'affouillement sous la fondation de la station.
- La station HOTEL, située en zone Irène, équivalente de H049 sur la digue Hotel, montrait des déplacements mesurables mais non significatifs.

■ Déplacements mesurés par rapport à la station J055

Les déplacements issus des mesures GPS de septembre 2018 à décembre 2021 sont tout d'abord examinés par rapport à la station J055. Celle-ci, située en zone stable côté lagon, a remplacé la station JEANNE du dispositif précédent.

⁶ Blewitt, G., Lavallée, D., Effect of annual signals on geodetic velocity, J. Geophys. Res., 107 (B7), 2002.

Les signaux des trois stations les plus à l'ouest (Figure 17) indiquent des mouvements faibles, dont les vitesses ne peuvent pas être estimées de manière précise :

- J055-K107 : ce sont les mesures les plus bruitées et présentant les plus fortes variations saisonnières parmi les neuf lignes de base. Les enregistrements, maintenant longs de quarante mois, permettent d'écarter l'occurrence de mouvements rapides et d'extraire des tendances en termes de déformation permanente. Les pentes moyennes, même si leurs valeurs ne peuvent pas être évaluées avec précision, semblent globalement nulles, suggérant l'absence de mouvement significatif à long terme.
- J055-G092 : les données disponibles suggèrent un très faible déplacement vers le nord-nord-est et une très légère subsidence avec des vitesses inférieures à 0,1 mm/mois. Une plus longue période de mesure pourrait conforter cette tendance.
- J055-A083 : les faibles subsidence et déplacement vers l'est-nord-est, entrevus les années précédentes se confirment, la subsidence est de l'ordre de 0,1 mm/mois, la composante vers l'est d'environ 0,2 mm/mois, et celle vers le nord n'excède pas 0,1 mm/mois. Par rapport à 2020, l'année supplémentaire de données conduit globalement à des vitesses légèrement inférieures en 2021. Cet ajustement des estimations, alors que la période d'acquisition des données GPS reste inférieure à la durée nécessaire pour s'affranchir des effets des variations saisonnières, illustre l'importance de disposer d'enregistrements suffisamment longs pour déduire des vitesses fiables. Ces valeurs restent cohérentes avec celles obtenues entre 2016 et août 2018 pour la ligne de base JEANNE-ALPHA du système de surveillance précédent.

Les données de septembre 2018 à décembre 2021 des stations situées à proximité de la zone Hélène (P077, T077, L075 et C075) montrent toujours des mouvements faibles par rapport à J055 (Figure 18). Les mesures disponibles des quatre lignes de base suggèrent des déplacements globalement cohérents, ceux-ci devront toutefois être précisés lorsque des enregistrements plus longs permettront de s'affranchir des effets saisonniers :

- Un déplacement vers le nord est détecté. Sa vitesse estimée à partir des mesures disponibles est de l'ordre de 0,1 mm/mois pour les stations P077 et T077 et semble légèrement supérieure, entre 0,1 et 0,2 mm/mois pour C075, située plus au nord, et L075. Des enregistrements plus longs permettraient de confirmer ces résultats.
- Les composantes Est-Ouest sont soumises à des variations transitoires entravant l'estimation des pentes. Les quarante mois d'enregistrements suggèrent cependant une absence de mouvement important à long terme dans cette direction.
- Les composantes verticales montrent une faible subsidence, d'environ 0,1 mm/mois.

Les estimations pour J055-C075 sont en bon accord avec les derniers résultats obtenus pour la ligne de base JEANNE-GPS1 du système précédent TELSITE. Cette ligne de base J055-C075 possède les mesures les plus sujettes aux variations saisonnières au sein de la zone Hélène, celles-ci peuvent biaiser l'estimation des déformations permanentes.

Les enregistrements des deux stations les plus à l'est, E071 et H049, montrent des interruptions en 2020 et 2021 (Figure 19). Exposés aux tempêtes, ces deux capteurs ont en effet subi à plusieurs reprises des dégradations nécessitant des interventions spécifiques sur site. Les matériels arrachés ou endommagés ont

été remplacés dès que de telles missions ont pu être programmées. En outre, la crise de la Covid-19 a entraîné le report en janvier-février 2021 de la mission de maintenance du système de surveillance initialement prévue à l'automne 2020. En conséquence de ces aléas météorologiques et sanitaires, les mesures de E071 sont interrompues du 8 mai 2021 au 11 septembre 2021, celles de H049 du 6 juin 2020 au 30 janvier 2021 et du 29 mars 2021 au 11 septembre 2021.

Les données disponibles pour ces deux stations E071 et H049 ne montrent pas de déplacements significatifs par rapport à J055 (Figure 19) :

- J055-E071 : les enregistrements exploitables pour l'interprétation en termes de déformation à long terme s'étendent de septembre 2018 à début mai 2021. Aucun mouvement global, ni horizontal, ni vertical, n'est détecté sur cette période. En l'absence de toute observation le corroborant, le saut visible début juin 2020 sur sa composante Nord (indiqué par une flèche sur la Figure 19), de l'ordre de -2 mm, reste sans explication à ce jour.
- J055-H049 : les mesures acquises en 2021 sont trop parcellaires pour être prises en compte dans l'interprétation. Par ailleurs, l'antenne de H049 ayant été repositionnée légèrement en retrait de son emplacement initial en mars 2019 suite à une tempête, les données de H049 recueillies avant cette date doivent être écartées de l'analyse. Les séries temporelles effectives sont trop courtes (14,5 mois) pour identifier et estimer de manière robuste des déplacements ; elles permettent en revanche d'écartier l'occurrence de déformations permanentes rapides avant mi-2020.

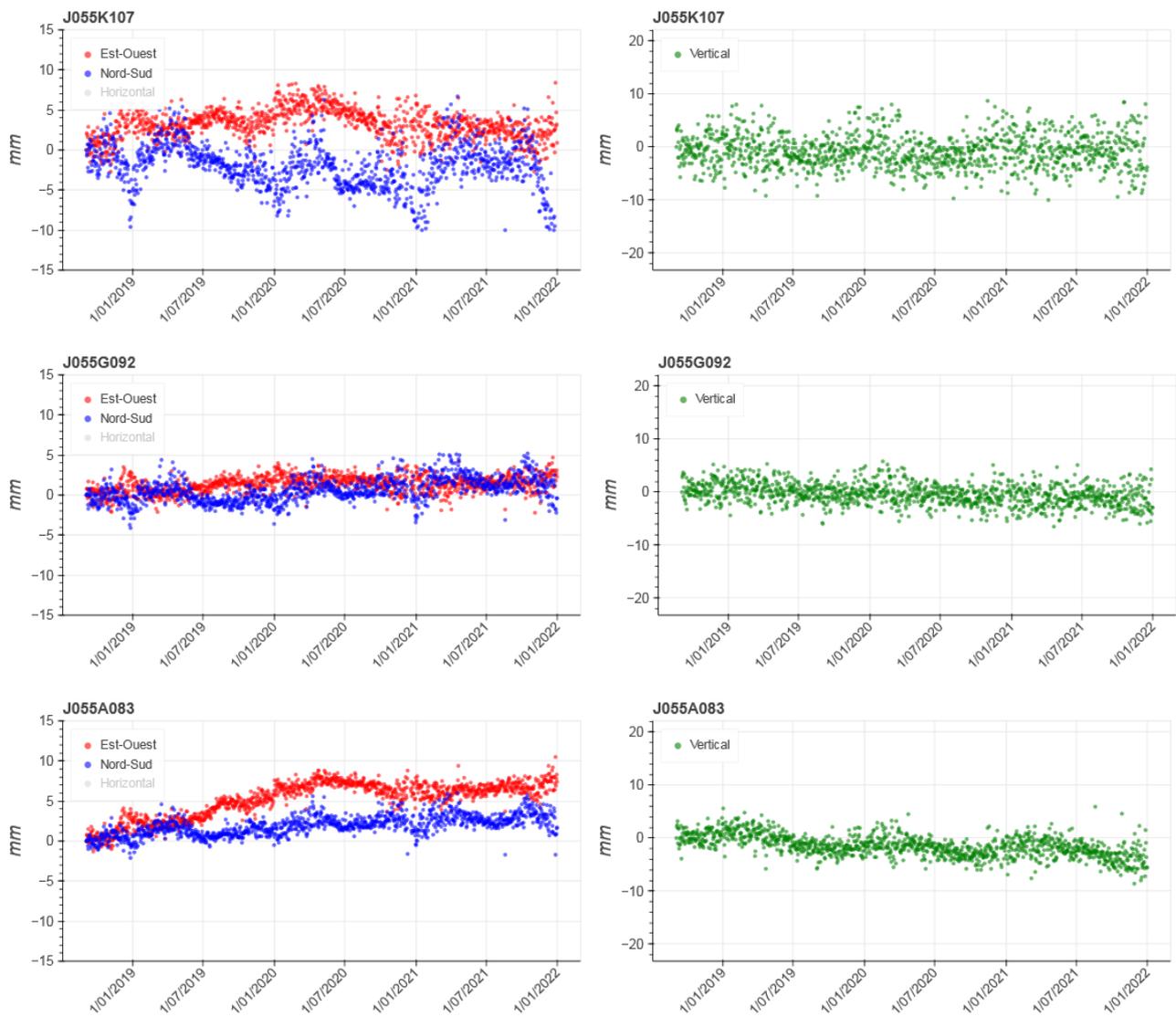


Figure 17 : A gauche, composantes Est (en rouge) et Nord (en bleu), à droite composante verticale (en vert) des déplacements par rapport à la station GPS de référence J055 des stations K107, G092 et A083 de septembre 2018 à décembre 2021.

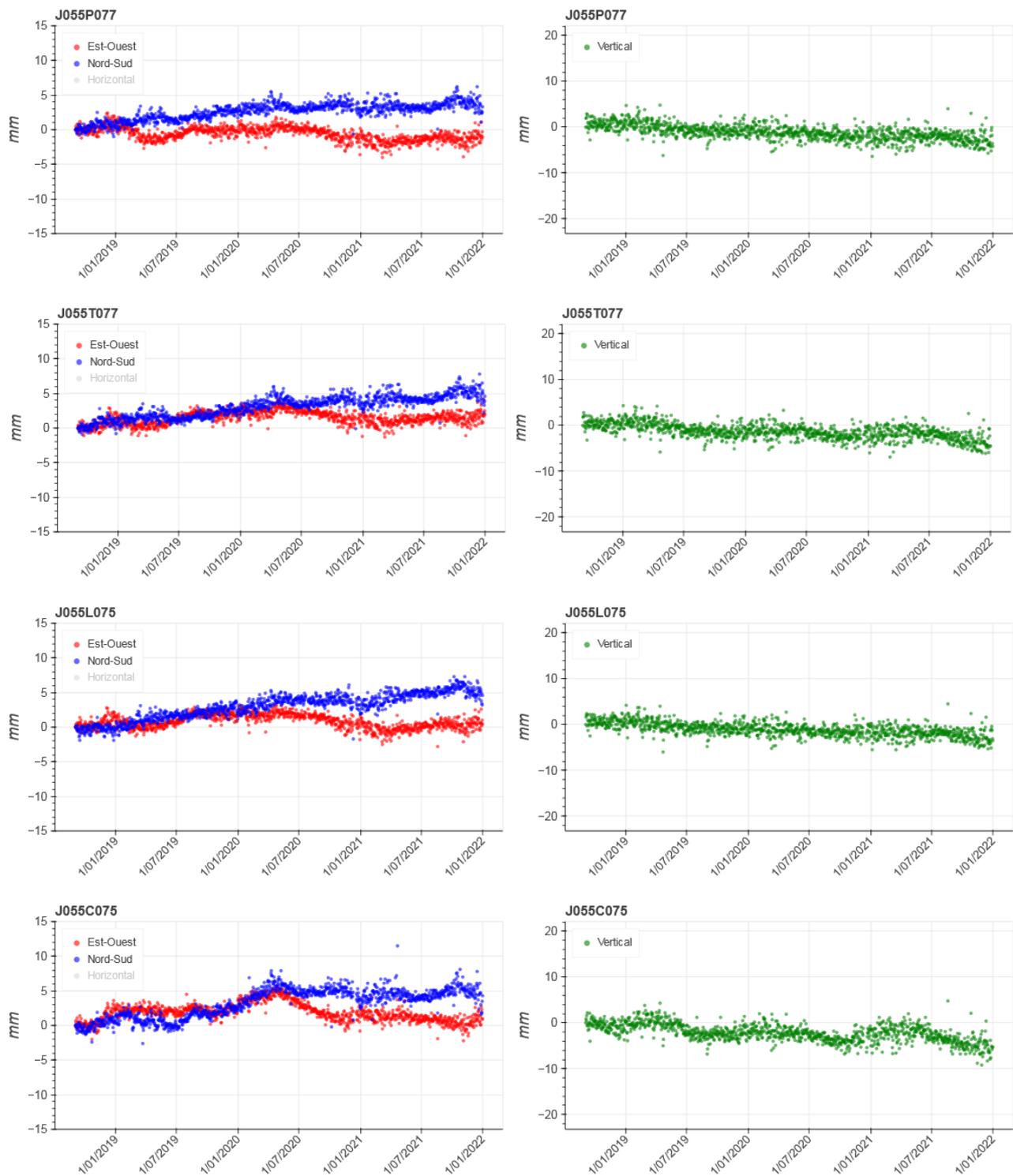


Figure 18 : A gauche composantes Est (en rouge) et Nord (en bleu), à droite composante verticale (en vert) des déplacements par rapport à la station GPS de référence J055 des stations en zone Hélène P077, T077, L075 et C075 de septembre 2018 à décembre 2021.

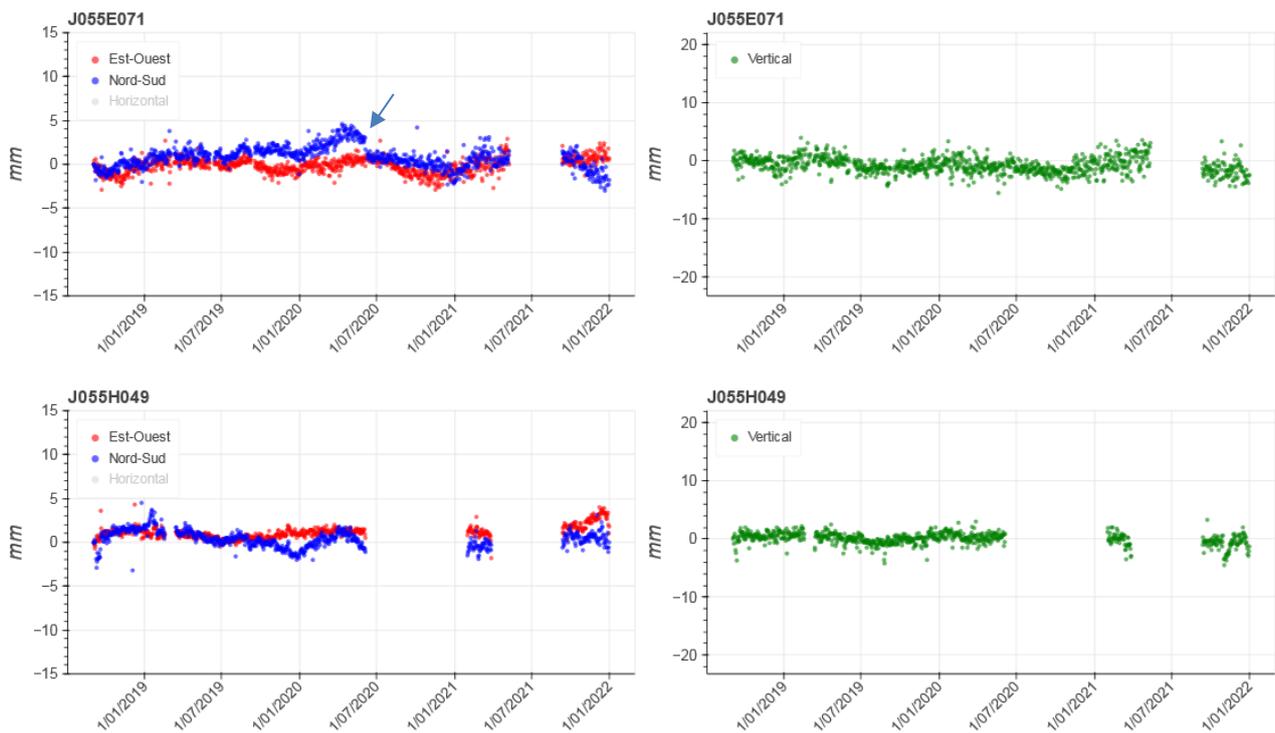


Figure 19 : A gauche composantes Est (en rouge) et Nord (en bleu), à droite composante verticale (en vert) des déplacements par rapport à la station GPS de référence J055 des stations E071 et H049 de septembre 2018 à décembre 2021. La flèche bleue pointe un saut, non expliqué à ce jour, dans les mesures de la composante Nord-Sud de J055-E071.

■ Déplacements mesurés par rapport à la station P077

En raison de sa position la plus interne coté lagon, la station P077 en zone Hélène est également utilisée comme référence pour calculer les lignes de base. Les déplacements relatifs des trois autres stations qui y sont implantées, T077, L075 et C075 (Figure 20), permettent en particulier d'examiner plus en détail les déformations au sein de ce secteur :

- Les trois lignes de base montrent un très faible mouvement vers le nord, sa vitesse estimée avec quarante mois de mesures est inférieure à 0,1 mm/mois.
- Aucun mouvement Est-Ouest distinct n'est détecté, seul un très faible déplacement vers l'est, de l'ordre de 0,05 mm/an, peut être entrevu pour P077-T077.
- Les composantes verticales des trois lignes de base n'indiquent pas de mouvement appréciable.

Les séries temporelles disponibles à ce jour suggèrent de très faibles déformations permanentes entre les différentes stations de la zone Hélène. Les mouvements sont d'autant plus difficiles à distinguer et caractériser qu'ils sont minimes.

Considérées par rapport aux stations J055 et P077, les mesures GPS disponibles en zone Hélène montrent un mouvement très limité vers le nord (entre 0,1 et 0,2 mm/mois), possiblement inférieur dans la partie la plus interne de l'atoll (0,1 mm/mois), ainsi qu'une légère subsidence (0,1 mm/mois). Cependant, ces déplacements étant très faibles et la durée des enregistrements restant encore courte pour pallier les variations saisonnières, les mouvements des différentes stations ne peuvent pas être distingués aisément et assurément les uns des

autres. Les données GPS écartent en revanche l'occurrence de déformation importante de ce secteur pendant la période d'acquisition.

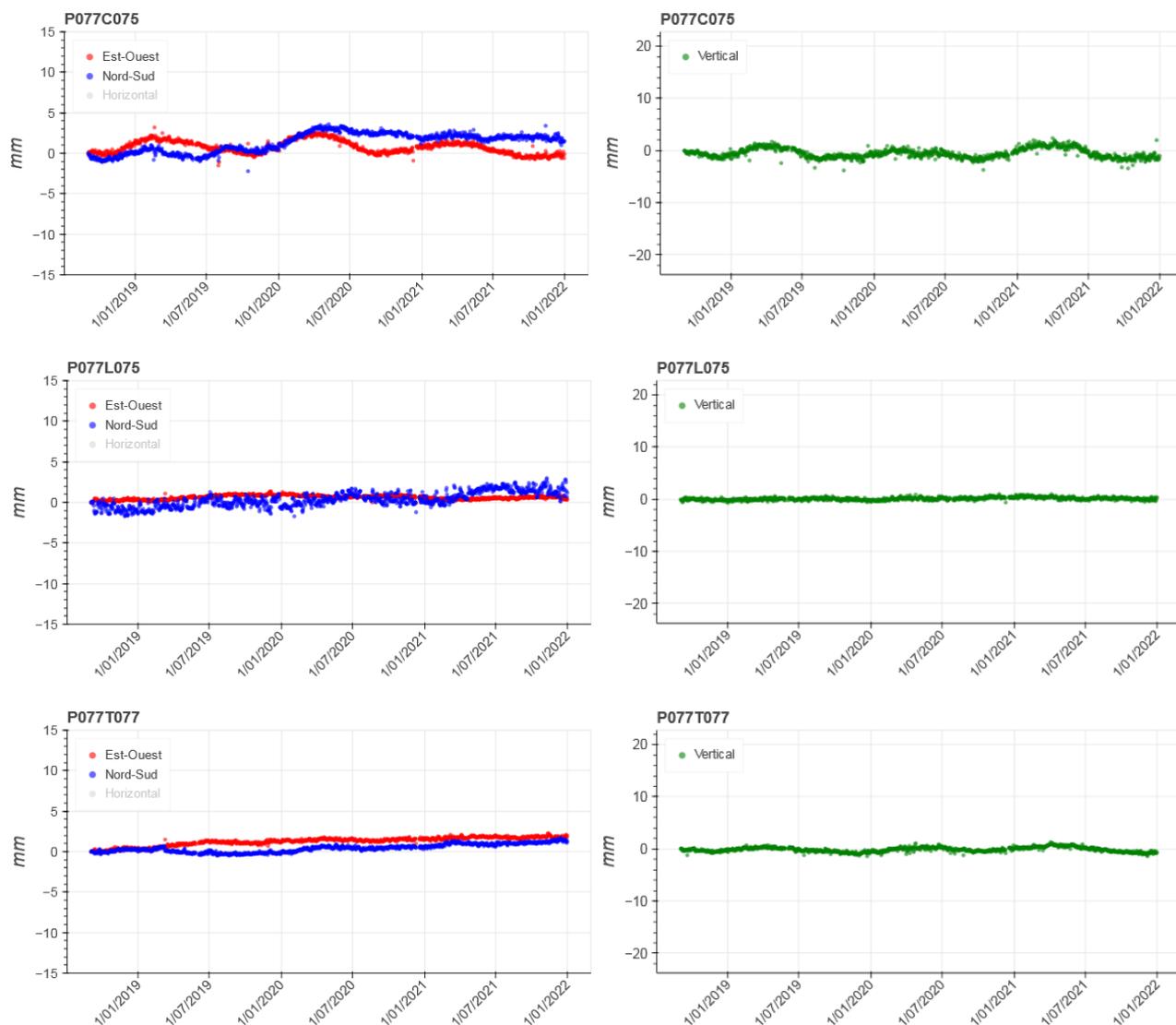


Figure 20 : A gauche composantes Est (en rouge) et Nord (en bleu), à droite composante verticale (en vert) des déplacements par rapport à la station GPS de référence P077 des stations C075, L075 et T077 de septembre 2018 à décembre 2021.

3.2.4. Synthèse des mesures de déplacements en surface

Le réseau GPS permanent actuel de TELSITE fournit à présent des séries temporelles longues de 3,3 ans, hormis pour deux stations (H049 et E071) ayant subi des coupures dues aux intempéries. Des biais sur l'estimation des déformations permanentes engendrés par les effets transitoires ne peuvent pas encore être totalement écartés, d'autant plus que ces déformations sont faibles.

Des tendances se dégagent cependant des quarante mois d'enregistrement :

- À l'est de la zone Hélène, l'absence de mouvement quantifiable traduit la stabilité de ce secteur.
- Les mesures GPS montrent que la partie instrumentée de la zone Hélène se déplace lentement vers le nord, ce mouvement pourrait être plus faible pour la partie interne côté lagon. Une faible composante en subsidence est également détectée.
- Les mesures GPS de la partie occidentale de la zone Camélia confirment la poursuite d'un faible déplacement vers l'est-nord-est et d'une faible subsidence.
- Plus à l'ouest, un déplacement lent vers le nord-est est détecté en zone Gisèle, tandis que les données en zone Françoise, particulièrement bruitées, écartent la possibilité de la survenue d'un mouvement important.

La durée d'acquisition des mesures GPS, maintenant de quarante mois au mieux, est encore courte pour que les effets saisonniers n'aient pas d'impact sur l'estimation des déformations permanentes. Les résultats doivent par conséquent être considérés avec précaution et devront être confirmés et, le cas échéant, précisés lorsque des mesures sur une plus longue période seront disponibles.

Les données GPS excluent l'occurrence de déformations importantes ou rapides pendant la période de mesure et indiquent que les mouvements restent faibles, en cohérence avec les observations des campagnes topographiques et avec les mesures antérieures à 2018.

3.3. Déplacements et déformations en profondeur

Dans chacune des zones Irène, Hélène et Françoise, les mouvements des flancs de l'atoll sont surveillés par deux extensomètres installés dans des forages inclinés, l'un à 30° et l'autre à 45° par rapport à l'horizontale (Tableau 2 et Tableau 3). En zone Hélène, les déformations en profondeur sont par ailleurs mesurées par une chaîne d'inclinomètres implantée dans un forage vertical (Tableau 2).

3.3.1. Mesures dans les forages inclinés latéraux (FIL)

■ Dispositif de mesures dans les FIL

Les mesures d'extensométrie concernent les déplacements d'un câble gainé ancré en fond de puits et mis en tension à la surface à l'aide d'un système de poulies et de contrepoids. Elles ont pour objectif de détecter les mouvements des terrains en profondeur, où les câbles sont ancrés, par rapport aux plateformes où sont situées les têtes de forage. Si de tels mouvements significatifs se produisaient, ils entraîneraient un allongement des câbles qui se traduirait par une augmentation des déplacements mesurés. Le choix du dispositif ancrage-câble-capteur s'est appuyé sur l'analyse de données et d'observations recueillies pendant la période de fonctionnement simultané avec le système précédent. Il est notamment caractérisé par :

- le matériau de l'âme centrale porteuse : l'Inconel 625 a été retenu pour sa résistance particulière à l'environnement corrosif marin. Cette âme, constituant l'élément mécanique proprement dit, doit être légèrement tendue et ainsi reproduire en surface le déplacement de l'ancrage en fond de puits ;
- la mesure du déplacement : elle est effectuée en surface par un capteur angulaire (codeur optique) monté sur une structure mécano-soudée appelée cabestan de mesure ;

- la gaine, dite fourreau, dans laquelle coulisse l'âme : elle permet le déplacement de cette dernière avec un minimum de frottements ;
- la dynamique du système de mesure de déplacement : les extensomètres du système TELSITE sont adaptés aux déplacements actuels, inférieurs à 1 cm/an, vitesse faible susceptible d'induire des épisodes de grippage.

Ce dispositif permet une dynamique maximum de l'ordre de $\pm 1,10$ m ; au-delà, une intervention humaine sur site est nécessaire. La résolution de 50 μ m est celle du codeur optique. En intégrant les facteurs pouvant légèrement influencer sur la dilatation du câble (variations de température, marées, ...), la résolution effective du dispositif peut être estimée de façon conservatrice en deçà du dixième de millimètres, largement suffisante pour détecter des changements de tendance significatifs.

Les zones Irène, Hélène et Françoise sont chacune instrumentées avec deux extensomètres implantés dans des forages inclinés, l'un à 30° et l'autre à 45°. Les caractéristiques de cette instrumentation sont indiquées dans le Tableau 4 ci-après.

ZONE	FIL	Profondeur de l'ancrage	Longueur du câble
Irène	FIL 5.30	140 m	267 m
	FIL 5.45	358 m	507 m
Hélène	FIL 7.30	241 m	483 m
	FIL 7.45	413 m	556 m
Françoise	FIL 10.30	278 m	513 m
	FIL 10.45	436 m	585 m

Tableau 4 : Profondeur d'ancrage et longueur des câbles des extensomètres implantés dans les forages inclinés latéraux (FIL) du système TELSITE.

■ Déplacements en profondeur mesurés par extensométrie dans les FIL

Lors de la refonte du système de surveillance, l'instrumentation de la zone Camélia du système précédent a été transférée en zone Hélène afin de mieux répondre aux objectifs de la surveillance géomécanique ainsi qu'à ses besoins fonctionnels. Les FIL du dispositif de surveillance précédent étaient situés en zones Irène, Camélia et Françoise. Les données utilisables d'extensométrie suivaient le plus souvent des évolutions par paliers et, avant la mise en place du système actuel fin août 2018, montraient des déplacements très lents :

- En zone Irène, depuis 2014, à l'exception d'une courte accélération à 1,4 mm/mois d'août à novembre 2017, l'évolution du FIL 5.45 était très lente avec une vitesse de quelques centièmes de mm/mois.

- En zone Camélia, au moins depuis 2012, le FIL 8.40 montrait une évolution très lente et en ralentissement continu. Un mouvement de corps rigide d'une partie du platier de ce secteur entrainant l'ensemble de la plateforme Camélia était évoqué pour interpréter ces résultats.
- En zone Françoise, après une période sans évolution débutée fin 2004 et suite à une intervention sur son câble en avril 2013, des déplacements ont été à nouveau observés pour le FIL 10.45. Une succession de courts épisodes de « hausses et paliers » a conduit à une accélération globale jusqu'en novembre 2017 atteignant 2,5 mm/mois. Les mesures ont ensuite montré un net ralentissement à 0,1 mm/mois qui s'est poursuivi jusqu'en août 2018.

En zone Irène, les mesures du FIL 5.45 (Figure 21) ont montré, depuis sa mise en place mi-2018 jusqu'en mars 2019, une évolution négative, alors qu'un allongement du câble se traduirait par des déplacements croissants. Cette décroissance est interprétée comme la mise en tension du câble. En l'absence d'autres indicateurs à la même période, aucune signification physique n'est attribuée aux sauts enregistrés dans les données au cours de janvier et février 2019. Depuis mars 2019, la courbe, dont les variations sont très faibles, montre la stabilisation du dispositif.

Sur toute la période de mesure, l'évolution du FIL 5.30 (Figure 21) montre des déplacements très faiblement croissants avec une vitesse moyenne n'excédant pas 0,02 mm/mois. L'absence de données du 2 février au 8 mars 2019 correspond à une période de dysfonctionnement du codeur.

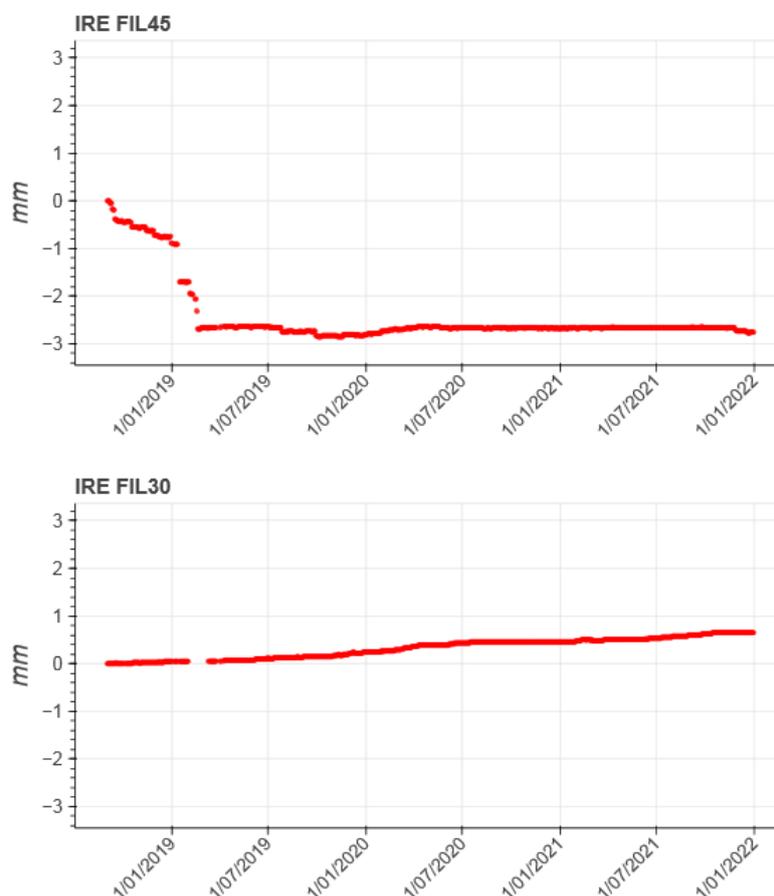


Figure 21 : Déplacements mesurés de septembre 2018 à décembre 2021 par les câbles implantés en zone Irène dans les forages inclinés de TELSITE, en haut, à 45° et, en bas, à 30°.

En zone Héléne, les données des deux extensomètres, FIL 7.45 et FIL 7.30 (Figure 22), montrent sur toute la période disponible une évolution décroissante, plus marquée pour le FIL 7.45. Ces tendances indiquent que les deux dispositifs ne sont pas stabilisés et suggèrent la mise en tension des câbles. L'ajout de contrepoids (environ +5% pour le FIL 7.45 et +7% pour le FIL 7.30) a été effectué début février 2021 afin de favoriser la stabilisation de ces FIL. Les brusques déplacements négatifs consécutifs à cette intervention, visibles sur les deux courbes, montrent qu'elle y a bien contribué, mais la lente évolution négative qui a repris ensuite suggère qu'elle n'a pas permis de l'achever. Différentes options sont en cours de test pour évaluer les interventions qui permettraient d'accélérer la remise en tension des câbles. En attendant ces investigations, les mesures GPS (§3.2.3), sismiques (§3.1) et inclinométriques (§3.3.2) permettent de conclure à une situation normale en zone Héléne.

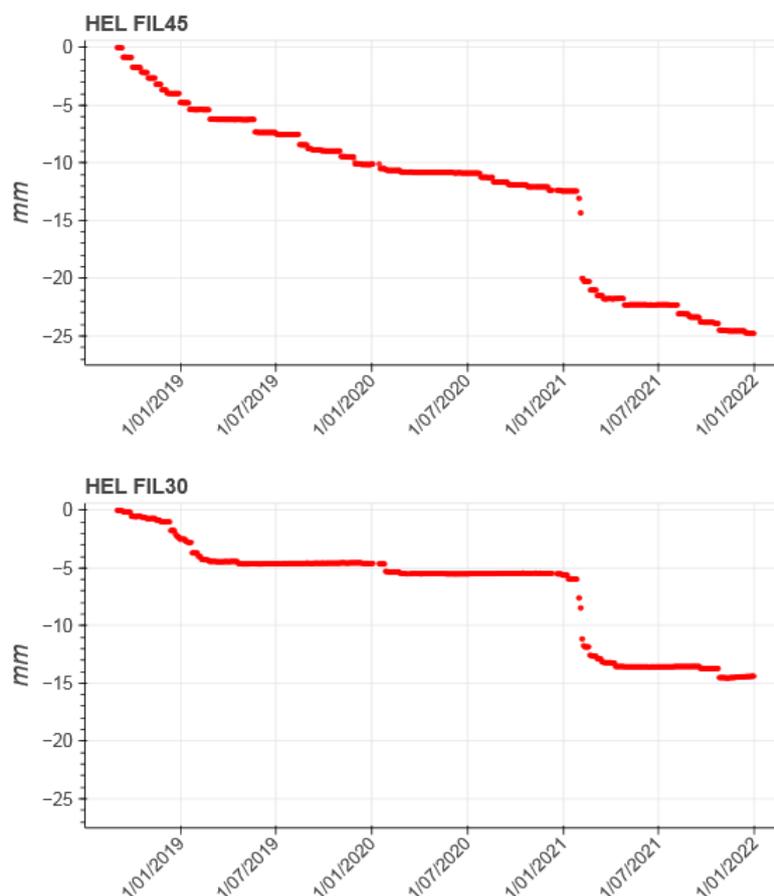


Figure 22 : Déplacements mesurés de septembre 2018 à décembre 2021 par les câbles implantés en zone Héléne dans les forages inclinés de TELSITE, en haut, à 45° et, en bas, à 30°.

En zone Française, les déplacements du FIL 10.45 (Figure 23) ont légèrement décliné au démarrage du système jusque fin 2018, tandis qu'une évolution faiblement croissante a été enregistrée dès le départ par le FIL 10.30. Début 2019, une panne a généré une absence de données d'environ deux mois.

À partir de 2019 jusque début 2020, les deux extensomètres ont suivi des évolutions croissantes, globalement concordantes. Les phases mineures et très brèves d'accélération qui sont enregistrées correspondent à des vitesses n'excédant pas 0,3 mm/mois.

Durant les six premières semaines de 2020, la vitesse moyenne de déplacement enregistrée par le FIL 10.45 est d'environ 0,2 mm/mois. De mi-février 2020 à mi-juillet 2020, ses enregistrements ont été interrompus en raison d'un dysfonctionnement du codeur. Depuis son redémarrage, aucun mouvement significatif n'est détecté.

A partir du printemps 2020, les déplacements du câble du FIL 10.30 ont légèrement ralenti, laissant place à une très faible évolution positive, avec une vitesse moyenne de l'ordre de 0,01 mm/mois, qui perdure jusque fin 2021.

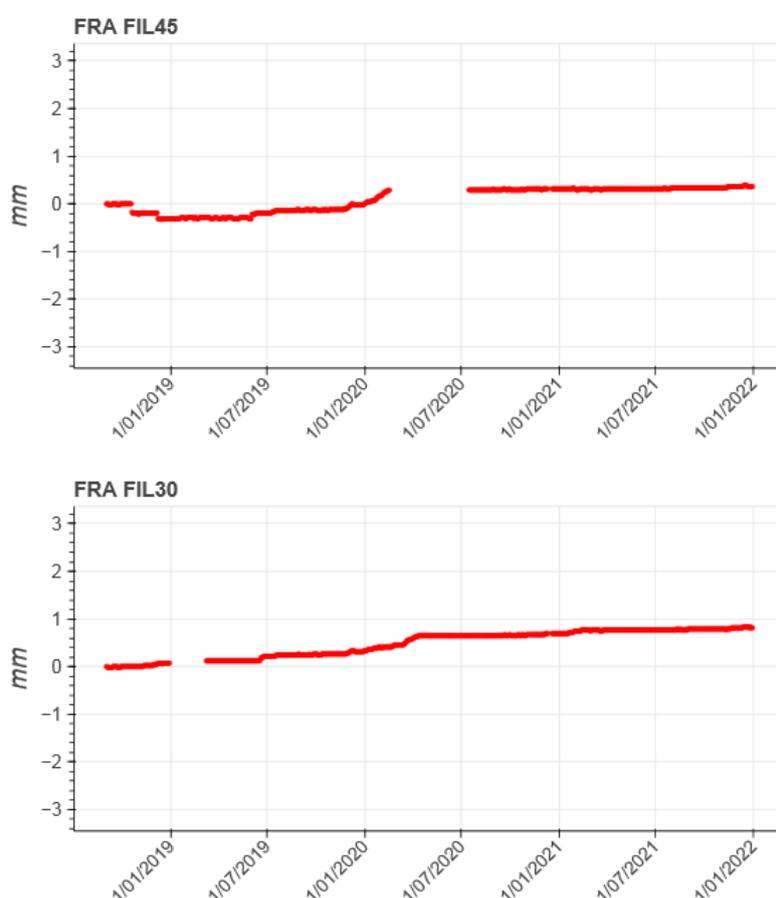


Figure 23 : Déplacements mesurés de septembre 2018 à décembre 2021 par les câbles implantés en zone Française dans les forages inclinés de TELSITE, en haut, à 45° et, en bas, à 30°.

■ Synthèse des mesures dans les FIL

Dans les trois zones équipées de FIL, les quarante mois de mesures extensométriques (de septembre 2018 à décembre 2021) ne montrent pas de mouvements importants des terrains où sont ancrés leurs câbles. Les mouvements les plus rapides, détectés dans les FIL de la zone Française sur de courtes périodes début 2020, sont de l'ordre de 0,3 mm/mois. Cette absence de mouvements significatifs en profondeur est cohérente avec

les mesures GPS en surface et avec les mesures acquises en 2018 dans les FIL du dispositif de surveillance précédent.

Des évolutions décroissantes apparaissent sur les enregistrements de certains FIL. Elles sont interprétées par la mise en tension des câbles. À ce jour, les dispositifs des FIL 7.30 et 7.45 en zone Hélène ne sont pas stabilisés, cependant la décroissance des mesures s'est globalement atténuée. Suite à l'ajout de contrepoids début 2021 pour favoriser la mise en tension, une période d'observation est nécessaire avant de procéder à une nouvelle intervention afin de ne pas risquer une rupture des câbles.

3.3.2. Mesures inclinométriques

■ Dispositif de mesures inclinométriques

La chaîne inclinométrique du système TELSITE est implantée en puits vertical en zone Hélène. Elle est constituée de dix caissons répartis sur toute la hauteur du puits, de 48 à 613 m de profondeur, afin de mesurer les déformations au sein des couches géologiques successives. Chaque caisson comporte deux modèles de capteurs inclinométriques, des "ClinoF" et des "Lily". La nomenclature des capteurs, leur profondeur et les faciès géologiques correspondants sont reportés dans le Tableau 5 ci-après.

■ Déformations en profondeur mesurées par inclinométrie

Comme indiqué précédemment, la chaîne inclinométrique du système TELSITE actuel est implantée en zone Hélène, tandis que celle du dispositif précédent était en zone Camélia ; leurs données ne peuvent donc pas être directement comparées.

Les mesures d'inclinométrie du dispositif de surveillance précédent, issues de trois capteurs implantés dans différentes couches profondes en zone Camélia, montraient des évolutions distinctes et variables au cours du temps depuis leur acquisition en 1996. A titre indicatif, les dernières tendances observées sont rappelées :

- Les données du **capteur n°29**, localisé à 350 m dans les calcaires crayeux, montraient une inclinaison globalement vers l'est-sud-est depuis 2004. En 2018, la vitesse de sa composante Est-Ouest était de l'ordre de -0,15 mdeg/mois et celle de sa composante Nord-Sud d'environ -0,25 mdeg/mois.
- Les mesures du **capteur n°26**, implanté à la base des calcaires crayeux à 376 m, indiquaient la poursuite en 2018 d'une inclinaison vers le nord d'environ 0,1 mdeg/mois.
- Les mesures issues du **capteur n°22**, situé dans une unité conglomératique sous les calcaires crayeux, à 451 m de profondeur, montraient une inclinaison vers le nord d'environ 0,1 mdeg/mois depuis avril 2011. Depuis 2017, une faible inclinaison vers l'ouest de l'ordre de 0,1 mdeg/mois était mesurée. La composante Est-Ouest, globalement faible depuis 2005, était considérée avec précaution ; elle avait subi des perturbations hautes fréquences inhabituelles principalement en 2014 et 2015 qui s'étaient progressivement estompées.

Une unique interprétation ne peut être retenue pour expliquer ces mouvements distincts, tous lents, à différentes profondeurs.

Capteur	Profondeur	Lithologie
HELJ_Lily	48 m	Calcaires supérieurs
HELJ_ClinoF		
HELI_Lily	139 m	Calcaires inférieurs
HELI_ClinoF		
HELH_Lily	205 m	Calcaires inférieurs
HELH_ClinoF		
HELG_Lily	281 m	Calcaires inférieurs dolomitiques et indurés
HELG_ClinoF		
HEL F_Lily	323 m	Calcaires crayeux et dolomies
HEL F_ClinoF		
HELE_Lily	344 m	Calcaires crayeux
HELE_ClinoF		
HELD_Lily	392 m	Dolomies colorées
HELD_ClinoF		
HELC_Lily	431 m	Zone de transition
HELC_ClinoF		
HELB_Lily	497 m	Zone de transition/début volcanisme
HELB_ClinoF		
HELA_Lily	613 m	Volcanisme
HELA_ClinoF		

Tableau 5 : Caractéristiques des inclinomètres du système TELSITE implantés dans le puits vertical en zone Hélène.

Les mesures inclinométriques du système TELSITE actuel montrent, de septembre 2018 à décembre 2021, des évolutions globalement lentes au sein des différentes couches sous-jacentes de la zone Hélène (Figure 24 et Figure 25). En l'absence de variations importantes sur cette période, les enregistrements des capteurs Lily, plus sensibles que les ClinoF, sont plus appropriés pour détecter les mouvements de faible amplitude. Les courbes obtenues pour les inclinomètres Lily J, I, H, G, F, D, B et A sont présentées (certaines voies des Lily C et E ne sont plus exploitables, cf. §6.1) :

- Le **Lily J** (Figure 24), le plus superficiel, est le seul subissant des variations cycliques de période annuelle bien marquées suggérant que les perturbations saisonnières ont un effet au moins jusqu'à ce capteur à 48 m de profondeur, mais n'affectent pas significativement le Lily I à 139 m. Leur amplitude crête à crête est de l'ordre de 1 à 2 mdeg. La composante Nord-Sud du Lily J montre une

tendance à long terme négative. Sur l'ensemble de la période d'enregistrement, la vitesse moyenne de cette inclinaison vers le sud-est de l'ordre de 0,05 mdeg/mois. La composante Est-Ouest est stable.

- Les deux composantes des **Lily I et H** (Figure 24) montrent des évolutions variables et des déformations cumulées très faibles. La plus forte inclinaison, mesurée par la composante Nord-Sud du Lily I, est de l'ordre de -1,9 mdeg sur les 40 mois d'enregistrements, soit une vitesse moyenne d'environ 0,05 mdeg/mois vers le sud. Le Lily H a enregistré deux discontinuités, le 4 octobre et le 4 décembre 2021, indiquant des mouvements brefs de l'ordre de 1 mdeg vers le sud et de 0,3 mdeg vers le nord respectivement.
- Depuis la mise en place du système, la composante Nord-Sud du **Lily G** (Figure 24) présente une évolution à long terme décroissante avec une vitesse moyenne d'environ 0,1 mdeg/mois vers le sud. La composante Est-Ouest ne montre pas d'évolution significative à long terme. Jusqu'au printemps 2020, des irrégularités étaient enregistrées, en particulier sur la composante Nord-Sud. Depuis, l'évolution du Lily G est globalement stable. Deux discontinuités sont également visibles les 4 octobre et 4 décembre 2021 ; leur amplitude, très faible, n'excède pas 0,2 mdeg.
- Les courbes des **Lily F, D, B et A** (Figure 25), les plus profonds, ont des évolutions distinctes, mais plus régulières que celles des capteurs plus superficiels présentés précédemment. Seule la composante Nord-Sud du Lily B montre de petites oscillations périodiques de faible amplitude (de l'ordre de 0,1 mdeg). Les 4 octobre et 4 décembre 2021, des discontinuités apparaissent également sur les mesures du Lily F, les inclinaisons correspondantes sont de l'ordre de 0,6 mdeg vers le nord. Les courbes du Lily D ne montrent qu'un saut d'environ 0,25 mdeg vers le sud-est le 4 décembre. Aucune discontinuité n'est détectée à ces deux dates par les Lily B et A. Ces mouvements ponctuels mis à part, les Lily F, D, B et A suivent des évolutions particulièrement stables. Seule la composante Nord-Sud du Lily B montre des irrégularités à plus haute fréquence, cette singularité conduit à considérer ses mesures avec prudence. Le Lily F montre une faible inclinaison à long terme vers le nord et le Lily D vers le sud-ouest depuis mi-2019, toutes deux avec des vitesses n'excédant pas 0,03 mdeg/mois. Des rotations vers le sud-est sont mesurées pour les Lily B et A, les plus profonds. Ces évolutions sont lentes, les vitesses de rotation sont en effet de l'ordre de quelques centièmes de mdeg/mois ; celle de la composante Nord-Sud du Lily B, la plus rapide, est de -0,08 mdeg/mois. Pour rappel, les données du Lily A ne peuvent pas être directement comparées aux mesures des inclinomètres du dispositif instrumental antérieur : la chaîne inclinométrique précédente était implantée en zone Camélia et le capteur le plus profond disponible était situé à 451 m dans une unité conglomératique au-dessus du volcanisme. L'évolution, désormais perceptible, de l'angle de cet inclinomètre est interprétée comme résultant de la subsidence naturelle de l'ancien édifice volcanique au cours du déplacement de la plaque tectonique sur laquelle il est bâti.

Les discontinuités des 4 octobre et 4 décembre 2021 ont été détectées par les Lily H, G, F et D. En revanche, aucun mouvement n'est visible sur les courbes des Lily J et I, les deux capteurs les plus superficiels, ni sur

celles des Lily B et A, les plus profonds. Les mesures suggèrent ainsi que seuls les capteurs situés dans la partie profonde du massif corallien, au-delà de 140 mètres, ont été affectés et que le socle volcanique n'a pas été impacté. Les sauts enregistrés correspondent à de très brèves et faibles rotations n'excédant pas 1 mdeg. A titre de comparaison, le passage des ondes sismiques de surface générées par les grands séismes distants de plusieurs milliers de kilomètres engendre des oscillations des inclinomètres dont l'amplitude est du même ordre de grandeur. Les discontinuités des 4 octobre et 4 décembre reflètent en revanche des déformations permanentes. Leur faible amplitude et leurs directions, différentes selon les profondeurs, ne permettent pas de les interpréter en termes de mouvements des masses rocheuses. L'épisode du 4 décembre fait suite au microséisme de magnitude M_L 1,35 survenu le 2 décembre en zone Française. Ces deux événements concernant des secteurs distincts, en l'absence d'élément autre que leur occurrence proche dans le temps, aucun lien entre les deux ne peut être établi.

Les ClinoF, dont la sensibilité est plus faible que celle des Lily, ne permettent pas d'identifier ces mouvements aussi clairement ; les discontinuités, bien que difficilement mesurables, se dégagent des mesures de quelques ClinoF uniquement.

Des pannes d'équipements de télécommunication sont à l'origine de quatre périodes de coupure des inclinomètres en 2020. La dernière, affectant les Lily J, H, F, D et B, est survenue fin décembre 2020 et s'est prolongée jusque mi-janvier 2021. Une interruption des Lily I, G et A, a eu lieu durant quelques jours fin janvier. L'ensemble des équipements touchés par ces pannes a été remplacé (cf. § 6.2). L'impact sur le taux de fonctionnement est limité (§ 6.1).

■ Synthèse des mesures inclinométriques

De brèves rotations, n'excédant pas 1 mdeg, ont été enregistrées les 4 octobre et 4 décembre 2021 par les capteurs situés dans la partie profonde du massif corallien. Ces mouvements sont interprétés comme deux épisodes de déformations permanentes de faible amplitude qui n'ont pas affecté les couches superficielles, ni le socle volcanique.

Outre ces déformations ponctuelles, les Lily opérationnels implantés dans le puits vertical en zone Hélène montrent des évolutions faibles et globalement stables, en particulier celui situé dans le volcanisme. Seul le capteur le plus superficiel est soumis à des variations saisonnières. Les mesures des Lily indiquent des mouvements à long terme très lents, au maximum de l'ordre de 0,1 mdeg/mois. Ce taux d'inclinaison correspond, en termes de déplacement entre les deux extrémités d'un inclinomètre d'un mètre de long, à une vitesse de l'ordre de 2 μm /mois.

Les mesures suggèrent des mouvements différentiels minimes et variables dans le temps entre les terrains instrumentés. Au vu de leurs très faibles vitesses et de leurs disparités, aucune interprétation pertinente en termes de déformation des masses rocheuses en profondeur ne peut être proposée.

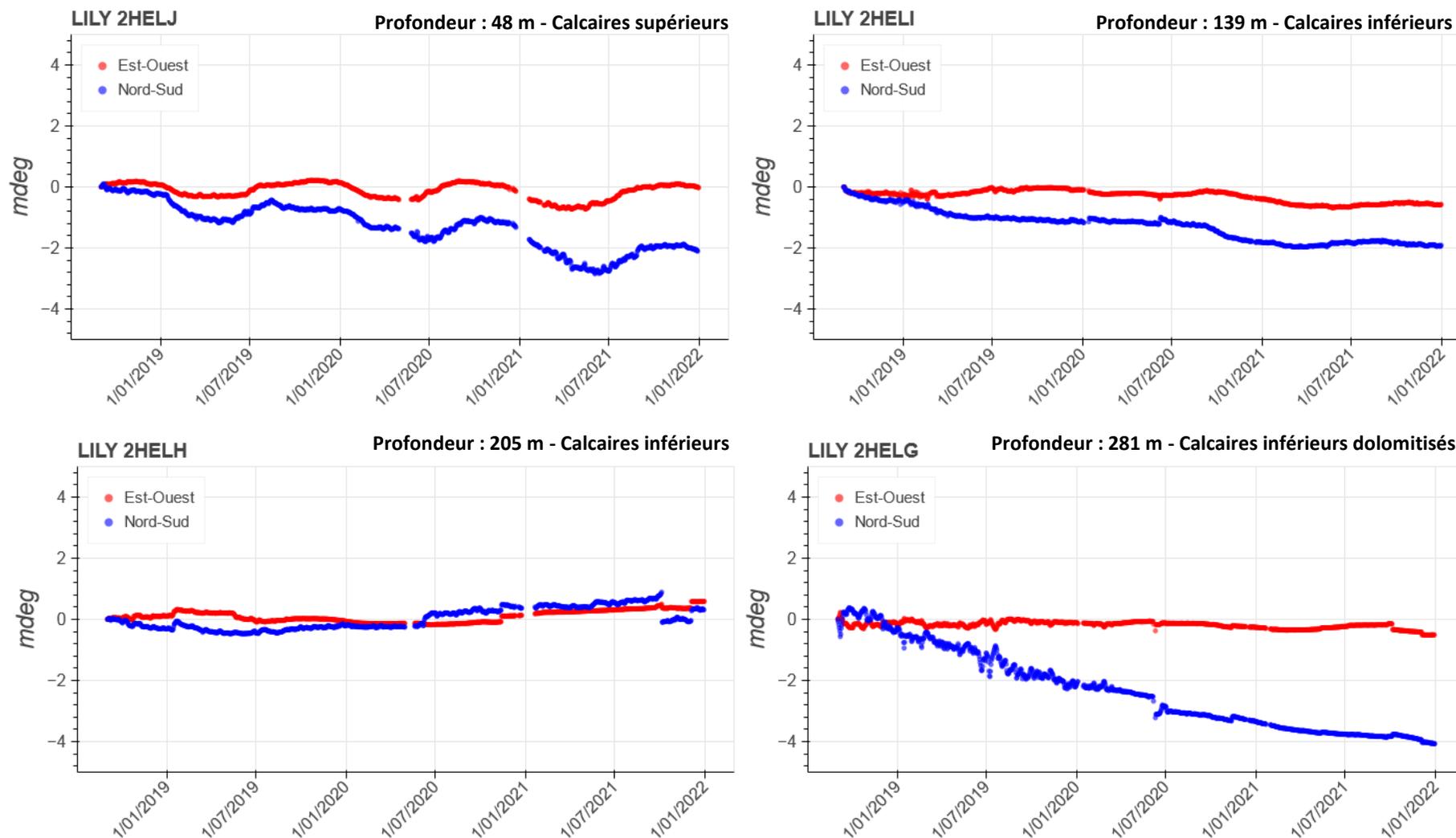


Figure 24 : Mesures de septembre 2018 à décembre 2021 des capteurs inclinométriques J, I, H et G de TELSITE, implantés en forage vertical en zone Hélène. L'échelle des ordonnées est choisie pour mettre en perspective ces évolutions par rapport à des variations de l'ordre de quelques mdeg/an au maximum correspondant à une situation normale.

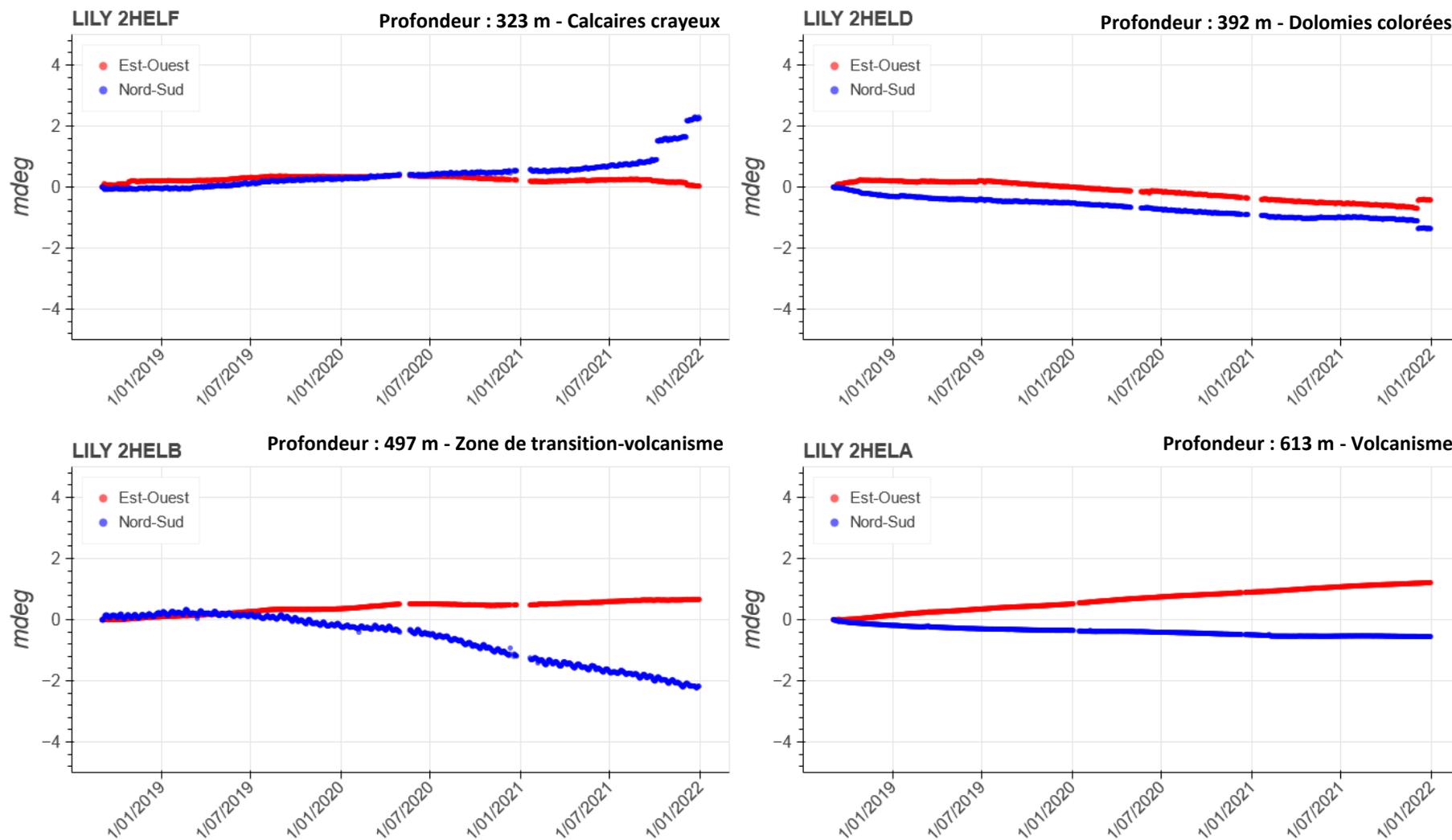


Figure 25 : Mesures de septembre 2018 à décembre 2021 des capteurs inclinométriques F, D, B et A de TELSITE, implantés en forage vertical en zone Hélène. L'échelle des ordonnées permet de mettre en perspective ces évolutions par rapport à des variations de l'ordre de quelques mdeg/an au maximum correspondant à une situation normale.

3.4. Synthèse de l'activité en zone Nord-Est

Une synthèse des mesures relevées en 2021 en zone Nord-Est est présentée au Tableau 6 : pour chaque indicateur (1^{ère} colonne), la vitesse moyenne sur toute l'année est estimée pour tous les enregistrements disponibles et la valeur maximale est retenue (3^{ème} colonne). Les vitesses sont discutées plus en détail dans les paragraphes précédents consacrés aux différents types de mesures. Ces valeurs sont comparées à celles observées après l'arrêt définitif des expérimentations en 1996 (2^{ème} colonne), qui elles-mêmes correspondent à celles observées dans les années précédant la reprise des expérimentations. Les valeurs au-delà desquelles un changement significatif d'évolution est attendu sont également indiquées (4^{ème} colonne).

Indicateur	Valeur observée en 1995-1996 (à la fin des expérimentations)	Valeur en 2021	Valeur associée à un changement d'évolution significatif (passage au niveau 1)
Sismicité : fréquence des microséismes	< 1 / semaine	0,60 / semaine	> 10 / semaine
Déplacements horizontaux*	< 2 mm / mois	0,2 mm / mois	> 20 mm / mois
Déplacements dans les forages inclinés	< 2 mm / mois	0,02 mm / mois	> 20 mm / mois
Déplacements verticaux*	< 1 mm / mois	0,1 mm / mois	> 10 mm / mois
Inclinométrie*	< 0,2 mdeg / mois	0,14 mdeg / mois	> 4,6 mdeg / mois

Tableau 6 : Synthèse des mesures TELSITE obtenues en zone Nord-Est en 2021 (3^{ème} colonne). Les valeurs observées à la fin des expérimentations (2^{ème} colonne) et celles associées à un changement significatif conduisant au passage au niveau 1 de risque (4^{ème} colonne) sont également reportées.

***En valeur absolue.**

Ces comparaisons sont illustrées sur les figures 26 à 28 en représentant simultanément, pour chaque type de mesures des déplacements, la série temporelle pour laquelle la vitesse moyenne maximale en 2021 est obtenue et les droites de pentes égales aux deux vitesses de référence (tiretés gris pour la situation observée en 1995-1996 et pointillés pour la limite des évolutions « significatives » qui porterait le risque au niveau 1 de l'échelle des risques) :

- Les données du FIL 5.30 en zone Irène sont comparées sur l'année 2021 aux vitesses de référence correspondantes, soit 2 et 20 mm/mois (Figure 26). L'évolution actuelle montre des vitesses très inférieures à celles de référence. Les quelques épisodes d'accélération sont très courts et restent très lents.

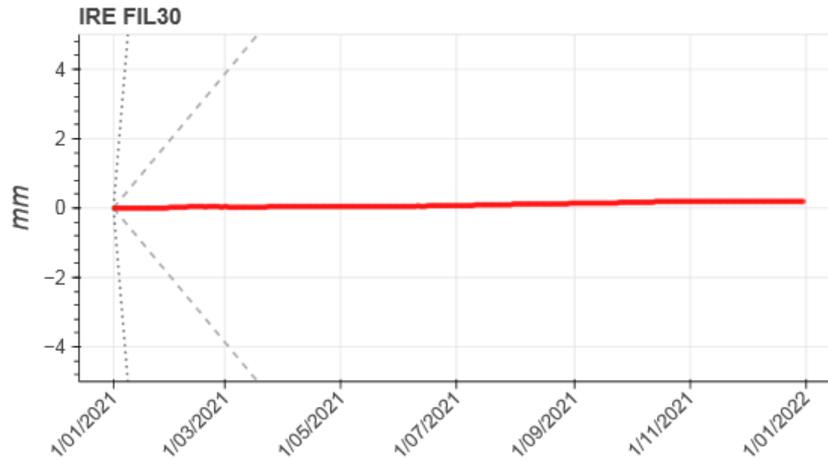


Figure 26 : Déplacements mesurés en 2021 par le câble du FIL à 30° en zone Irène comparés aux vitesses de référence (tiretés et pointillés gris) définies dans le Tableau 6 (2 et 20 mm/mois respectivement).

- L'inclinomètre Lily F, situé à 323 m de profondeur, montre les variations les plus importantes en 2021. Celles-ci résultent des sauts enregistrés les 4 octobre et 4 décembre qui se sont cumulés avec le mouvement global à long terme, tous s'accomplissant dans le même sens. Les variations pour l'année 2021 sont néanmoins plus lentes que celles observées au moment de l'arrêt des expérimentations en 1996, i.e. inférieures à 0,2 mdeg/mois (Figure 27).

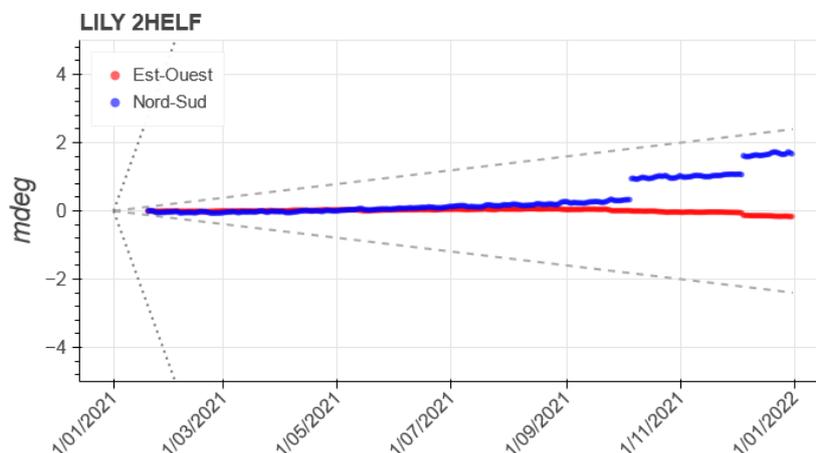


Figure 27 : Mesures en 2021 du capteur inclinométrique Lily F comparées aux vitesses de référence (tiretés et pointillés gris) définies dans le Tableau 6 (0,2 et 4,6 mdeg/mois respectivement). Les courbes ne démarrent pas au 1^{er} janvier en raison d'une coupure des données suite à une panne réparée mi-janvier.

Comme indiqué précédemment (cf. §3.2.2), examiner les mesures GPS sur une seule année n'est pas pertinent pour distinguer les déformations permanentes des variations saisonnières. Une plus longue période est nécessaire, idéalement 4,5 ans. C'est pourquoi la comparaison aux vitesses de référence est réalisée sur la totalité de la période de mesures disponibles, de septembre 2018 à décembre 2021 :

- La ligne de base J055-A083 montre les déplacements les plus importants des données GPS. Son déplacement horizontal (norme du vecteur défini par les composantes Est-Ouest et Nord-Sud) est

représenté avec les droites de pente 2 et 20 mm/mois, et sa composante verticale avec les droites de pente 1 et 10 mm/mois (Figure 28). Les tendances globales des courbes de J055-A083 sont très inférieures à ces vitesses de référence définies dans le Tableau 6. Seules les variations saisonnières montrent à court terme des vitesses de déformation pouvant atteindre le même ordre de grandeur, mais ces déformations cycliques sont transitoires.

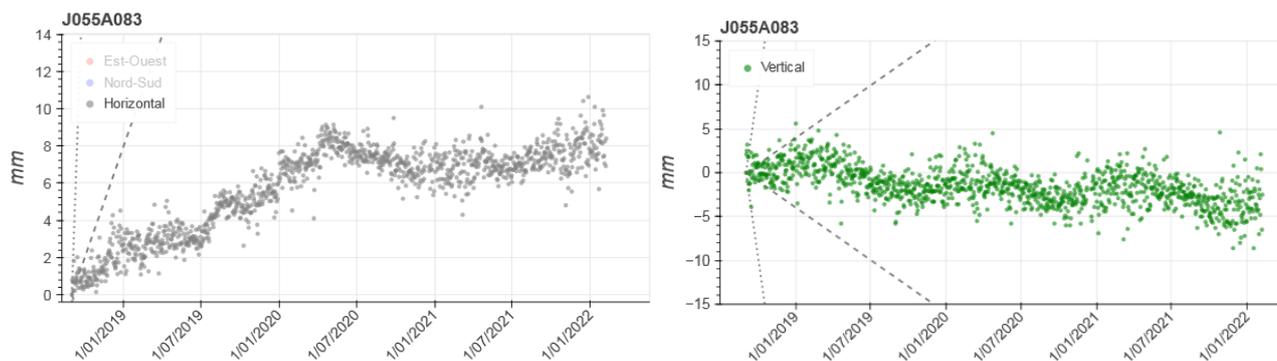


Figure 28 : A gauche, composante horizontale (norme) et à droite, composante verticale des déplacements de la station A083 par rapport à la station GPS de référence J055 de septembre 2018 à décembre 2021 comparées aux vitesses de référence (tiretés et pointillés gris) définies dans le Tableau 6.

Le suivi temporel de la situation géomécanique et du niveau de risque de la zone Nord-Est de Moruroa est présenté en annexe 2. Il s'appuie sur l'estimation d'un indicateur global, appelé vitesse relative VR, qui est reporté Figure 29.

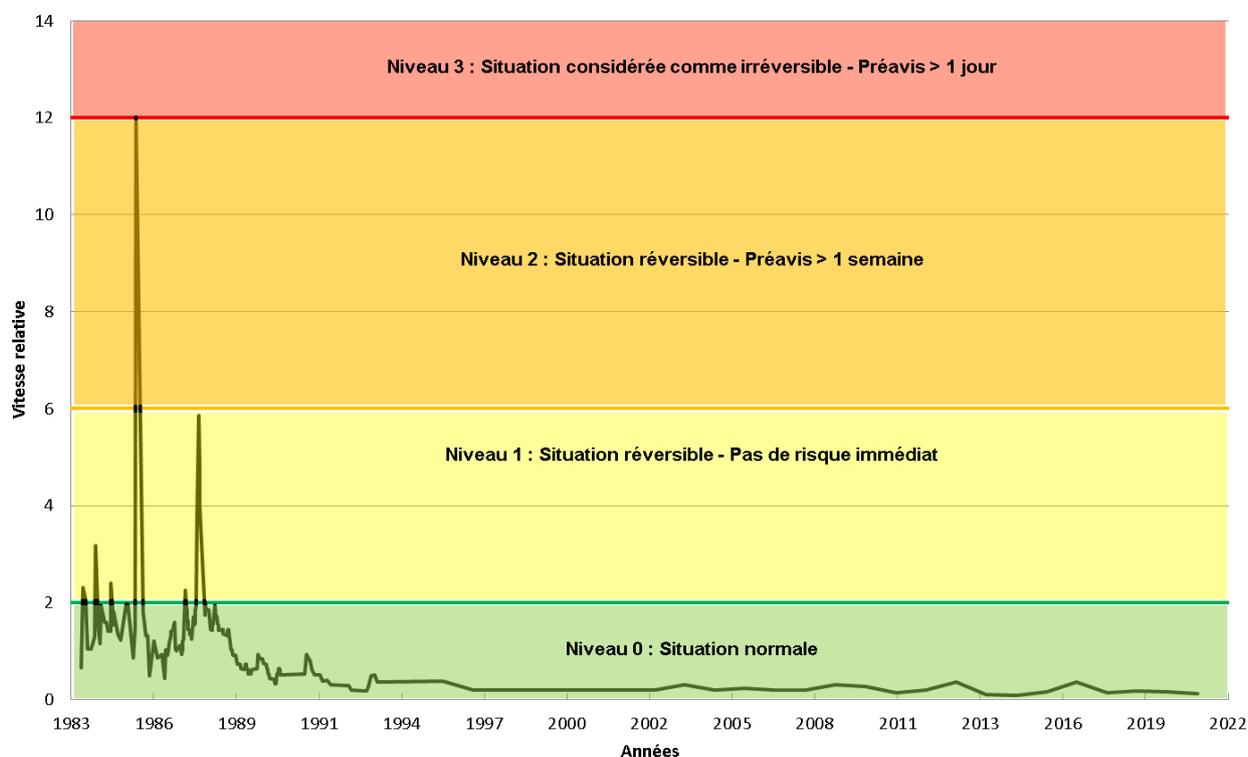


Figure 29 : Evolution au cours du temps de la vitesse relative VR, indicateur global de la situation géomécanique à Moruroa. Les niveaux de risque du tableau 1 et, le cas échéant, les délais de préavis vis-à-vis d'un évènement de grande ampleur et les situations associées, sont également reportés.

En 2021, les indicateurs de la déformation observée (issus des mesures de sismicité, données GPS en surface, mesures d'extensométrie dans les forages inclinés latéraux et d'inclinométrie en puits) correspondent à une évolution très lente, en ralentissement depuis l'arrêt des expérimentations.

Au vu de l'ensemble de ces observations, l'activité géomécanique actuelle de la zone Nord-Est peut être classée au niveau zéro de l'échelle des risques (Tableau 1), correspondant à une situation normale.

4. Bilan de l'évolution dans le secteur Sud-Est (zone Simone)

Le système TELSITE actuel, contrairement au précédent, ne comporte pas de station sismique en profondeur en zone Simone ; les priorités définies lors de la conception du dispositif ont en effet conduit à ne conserver qu'une station en surface. Cette modification instrumentale implique un suivi moins fin de la micro-sismicité pour le secteur Sud-Est :

- la capacité de détection est diminuée (les plus petits évènements sismiques ne sortent pas du bruit de fond microsismique ; ils sont, par exemple, difficilement distingués du signal généré par des vagues),
- l'incertitude sur la localisation et sur la profondeur est beaucoup plus importante pour les petits relâchements de contraintes qui ne sont enregistrés que par la seule station de surface.

Ces évolutions, dont les conséquences avaient été prises en compte, n'altèrent toutefois pas les capacités du système à détecter tous les évènements significatifs ($M_L \geq 1,0$). Ses performances globales répondent aux objectifs de la surveillance. Par ailleurs, comme le montrent les enregistrements cette année, de plus petits évènements peuvent être identifiés par temps calme.

Après près de trois ans sans aucun relâchement de contraintes détecté en zone Simone, cinq ont été enregistrés en 2021 dans la partie interne de l'atoll (Figure 30).

Leur magnitude M_L se situe dans la gamme de celles relevées depuis 2000 (Figure 31). Les deux plus élevées, obtenues pour deux évènements survenus le même jour (le 30 novembre), restent faibles, juste en-dessous de 1,5. Les trois autres sont proches de 0,5 ou inférieures, deux ont eu lieu le 30 novembre également et le troisième le 22 mai. En l'absence d'élément autre que leur occurrence proche dans le temps, aucun lien entre les relâchements de contrainte du 30 novembre en zone Simone et l'évènement survenu le 2 décembre en zone Française ne peut être établi.

Bien que ces évènements fassent suite à une période de près de trois ans sans détection, l'activité sismique en zone Simone reste très faible, dans la continuité de celle observée depuis 2017. Elle montre par ailleurs la capacité de la station de surface à détecter les évènements significatifs, ainsi que de plus petits relâchements de contraintes dans les situations les plus favorables, c'est-à-dire lorsque, par temps calme, le bruit de fond microsismique est faible.

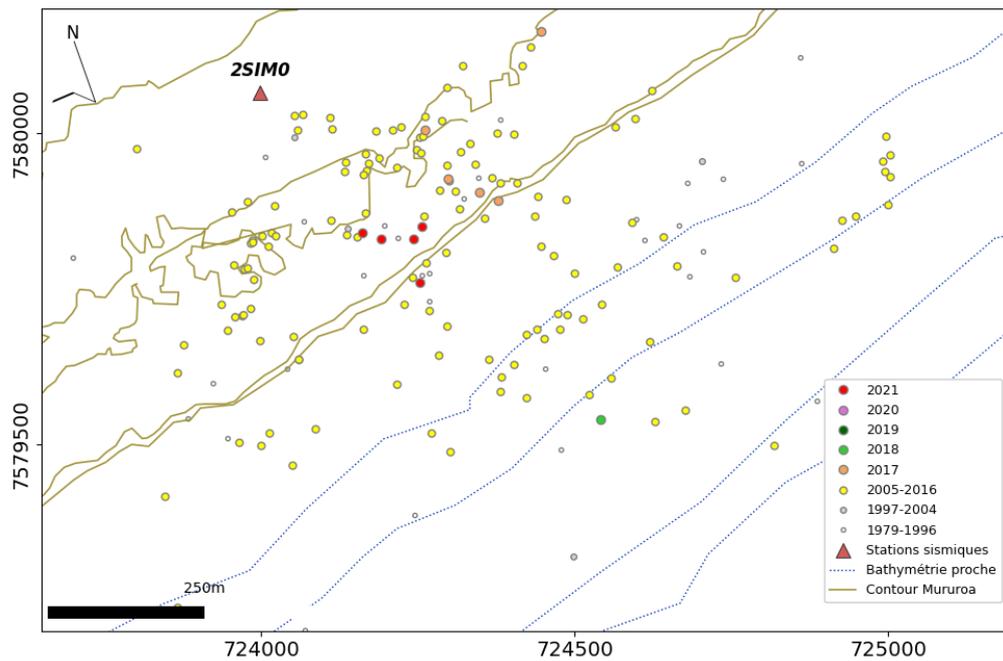


Figure 30 : Carte des événements microsismiques localisés de 1980 à 2021 en zone Sud-Est (localisation exhaustive depuis décembre 2005 des événements d'amplitude suffisante pour être localisés). Le triangle rouge représente la station sismique de surface (2SIM0). Les contours bruns délimitent l'estran.

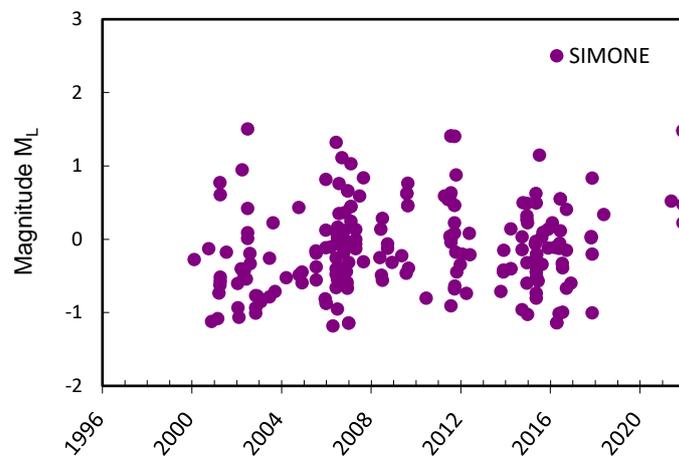


Figure 31 : Distribution temporelle des magnitudes M_L pour le secteur Sud-Est en zone Simone.

5. Campagne topographique 2021 : principaux résultats

Des campagnes spécifiques de levés topographiques sont menées à Moruroa et à Fangataufa pour examiner les mouvements en surface, à une échelle plus globale que celle fournie par le réseau de télésurveillance. Elles font l'objet de prestations pilotées par le CEA/DAM avec le concours de différentes unités du Commandement Supérieur en Polynésie française. La dernière a eu lieu du 27 octobre au 24 novembre 2021 et a fait l'objet d'un rapport établi par le CEA/DAM en juillet 2022. Les principaux résultats déduits des mesures recueillis sont présentés ci-après. Les conclusions des campagnes antérieures (1996, 2001, 2007 et 2014) ont été rapportées dans des bilans antérieurs.

Les prestations sollicitées, dont l'ensemble a été accompli, incluent des mesures de positionnement horizontal sur les deux atolls et de positionnement vertical à Moruroa, et des relevés de fracturation. Comparées à celles obtenues lors des campagnes précédentes, les positions relevées en 2021 permettent d'estimer les déplacements moyens actuels sur la période 2014-2021 et d'examiner leur évolution depuis la fin des expérimentations en 1996.

5.1. Principaux résultats pour Moruroa

Sur l'atoll de Moruroa, les résultats issus des campagnes topographiques sont en accord avec les mesures continues de surface du système TELSITE. Les déplacements horizontaux et verticaux annuels moyennés entre 2014 et 2021 sont faibles dans tous les secteurs investigués :

- En zone Nord-Est, comme par le passé, les déplacements les plus importants sont mesurés au centre du secteur Camélia. Les mouvements observés, vers l'océan et en subsidence, décroissent cependant depuis la fin des expérimentations. Le ralentissement est plus marqué pour les composantes horizontales pour la période 2014-2021.
- Dans la partie interne de la zone Nord-Est, les vitesses horizontales maximales sont à présent d'environ 1,5 mm/an.
- Sur son platier externe, les déplacements horizontaux ont progressivement ralenti atteignant au maximum 2-2,5 mm/an.
- Après leur ralentissement global depuis 1996, les mouvements de subsidence restent faibles. Leurs vitesses maximales, mesurées en zone Camélia, sont de 2 mm/an sur la route (zone interne) et comprises entre 1 et 4 mm/an sur les digues (zone externe).
- De part et d'autre du secteur Camélia, les mouvements mesurés sont très faibles. Les vitesses horizontales sont au maximum de 1,5 mm/an. La subsidence n'excède pas 1 mm/an à l'est et 2 mm/an à l'ouest.
- En zone Sud-Est, les mesures de planimétrie réalisées sur le platier ne montrent pas d'évolution significative. Le long de la route, une très faible subsidence centrée sur le PK6S perdure, sa vitesse actuelle n'excède pas 1 mm/an.

Les informations issues de la campagne topographique 2021 confortent les prévisions d'un ralentissement global progressif des déplacements en surface au centre du secteur Camélia.

5.2. Principaux résultats pour Fangataufa

A Fangataufa, les mouvements mesurés entre 2014 et 2021 sont dans la gamme de ceux estimés depuis 1996. Ils sont conformes aux prévisions de ralentissement très net de l'évolution après la fin des expérimentations, notamment dans les zones Nord et Nord-Est. Ainsi, les mesures topographiques ne révèlent pas d'évolution significative du platier depuis la période 2001-2007 dans la limite de la précision des mesures.

5.3. Interprétation pour la zone Nord-Est de Moruroa

Les résultats d'évolution, déduits de l'ensemble des mesures du système continu TELSITE et de la campagne topographique 2021, sont compatibles avec l'interprétation suivante :

- Les zones Françoise, Camélia et Irène présentent des mouvements lents en profondeur.
- En zone Françoise, le mouvement en profondeur, qui était le plus notable par le passé, est à présent analogue à celui des autres zones.
- En surface, c'est en zone Camélia que les mouvements, bien qu'en ralentissement, restent les plus importants, et touchent la partie émergée. Le mécanisme global en profondeur interagit avec des mouvements plus superficiels de blocs rocheux.
- En zone Irène, le mouvement, qui intéressait, en zone externe, une partie immergée des masses carbonatées situées au-delà des fractures sous-marines, est à présent faible.

6. Fonctionnement du système TELSITE en 2021

6.1. Disponibilités des mesures

Les disponibilités des différentes mesures continues du système TELSITE sont supervisées grâce à des sondes numériques. Les taux de disponibilité relevés sont les suivants :

- pour les capteurs sismiques impliqués dans l'alerte : 99,8%.
- pour les capteurs sismiques complémentaires : 99,9%.
- pour les capteurs GPS : 90,8%.

Ce taux reflète :

- l'arrêt de la station H049 jusqu'au 31/01/2021 suite à une tempête ayant arraché son antenne le 06/06/2020 (la crise sanitaire de la Covid-19 avait écarté la possibilité d'une intervention de maintenance plus précoce),
- l'arrêt de la station H049 du 08/03/21 au 12/09/21 suite à une perte de connexion liée à un défaut de la bretelle coaxiale,

- l'arrêt de la station E071 à partir du 17/05/21 suite à une tempête ayant arraché son antenne remplacée le 11/09/21.
- pour les extensomètres : 99,7%.
- pour les inclinomètres en puits : 92,0%.

En omettant les voies Est-Ouest du Lily C et Nord-Sud du Lily E pour lesquelles les signaux ne sont plus exploitables⁷, le taux de disponibilité est de 96,8%. Le principal déficit est lié à une panne d'équipement de télécommunication ayant touché la transmission des données de la moitié des capteurs du 23/12/20 au 26/01/21.

- pour les marégraphes : 85,3%.

Ce taux reflète notamment des coupures en janvier 2021 qui ont affecté les données marégraphiques en Hélène, Dindon, Irène et Kilo. Les dépannages ont été menés lors de la mission de maintenance fin janvier début février 2021. Les capteurs d'Irène et de Viviane sont également tombés en panne les 13/06/21 et 02/04/21 respectivement. Non essentiels à la surveillance et non nécessaires à l'alerte, leur remplacement a été effectué en septembre 2021 lors de la mission de démantèlement du système de surveillance précédent.

Au final, les objectifs d'alerte à 90 secondes et de surveillance géomécanique de long terme ont été assurés pendant 100% de l'année 2021.

6.2. Faits marquants et actions de maintenance

En 2021, des actions de maintenance curative et préventive ont été menées au cours de la mission dédiée du 27 janvier au 8 février et lors de la mission de démantèlement du système de surveillance précédent du 6 septembre au 27 octobre.

Les principales actions de maintenance curative sont les suivantes :

- pour les capteurs GPS : remplacement des antennes des stations H049 (30 janvier) et E071 (11 septembre) arrachés par des tempêtes, des liaisons (30 janvier) et de la bretelle coaxiale de H049 (11 septembre),
- remplacement du capteur sismique de surface 3ESP en Simone (9 septembre) endommagé suite à une inondation de l'abri,
- remplacement des marégraphes, à la suite de tempêtes, en Kilo (31 janvier), Dindon (2 février et 16 septembre), Viviane (8 septembre), et Hotel (13 septembre),
- pour les chaînes d'acquisition : remplacements de trois numériseurs et des cartes mémoire de quatre autres lors des deux missions,

⁷ Le retour d'expérience sur la fragilité de ce type de capteur au moment de leur installation a incité à prévoir une large redondance de cette technologie dans la conception du deuxième dispositif du système TELSITE. Grâce à cette anticipation, la mesure d'inclinométrie reste disponible à toutes les profondeurs.

- pour les télécommunications : reprise de soudure de la fibre optique entre Denise et Edith endommagée par des rats (29 septembre),
- pour l'alimentation : remplacement d'un connecteur de la centrale solaire en Kilo (19 février).

Les actions de maintenance préventive suivantes ont été menées lors de la mission du 27 janvier au 8 février :

- test des capteurs de secours des puits Hélène, Françoise et Irène,
- test des extensomètres en Irène, Hélène et Françoise,
- ajout de contrepoids sur les FIL7.30 et FIL7.45 en Hélène,
- sauvegarde de l'ensemble des données instrumentales,
- remplacement des boîtiers de stockage en réseau,
- mise en place d'une alimentation contrôlable à distance du coffret du Lily G,
- remplacement des switchs (équipements réseau) des baies TELECOM (au cours de l'année 2020, plusieurs switchs sont tombés en panne ; tous étant issus de la même série, ils ont été remplacés par des équipements d'une autre série),
- mise en place d'une surveillance en température et humidité de baies TELECOM en Hélène et Denise,
- installation d'un relais radio supplémentaire en Dindon afin d'améliorer la diffusion de l'alerte et les communications,
- contrôle des centrales solaires et des systèmes de distribution associés.

En dehors de ces missions, une intervention de dépannage le 18 janvier 2021 a permis le remplacement du switch de la baie TELECOM Hélène GEO2. Sa panne, survenue le 23 décembre 2020, a engendré la coupure de la moitié des inclinomètres.

6.3. Bilan du fonctionnement de TELSITE pour l'année 2021

Le dispositif automatique d'alerte, dit à 90 secondes, du système TELSITE a été opérationnel durant toute l'année 2021.

Les tests réalisés chaque mois ont permis de vérifier le bon fonctionnement de toute la chaîne d'alerte et, notamment, la bonne diffusion des alertes sur le site et vers la métropole.

La redondance des capteurs a permis d'assurer les suivis de la microsismicité et de l'évolution géomécanique de manière régulière tout au long de l'année.

7. Conclusion générale

Le bilan de la surveillance géomécanique de Moruroa repose, pour l'année 2021, sur les mesures du système de télésurveillance TELSITE, opérationnel depuis septembre 2018. Il a permis d'assurer un suivi continu sur toute l'année et répond aux objectifs de la surveillance de l'atoll.

Le système automatique d'alerte dit à 90 secondes a été opérationnel durant toute l'année 2021.

Les mesures effectuées permettent de classer le niveau d'évolution géomécanique de Moruroa au niveau 0 de l'échelle des risques.

Globalement, l'ensemble des mesures, toutes inférieures ou de niveau comparable aux valeurs de référence observées juste après la dernière campagne d'expérimentations de 1996, indique une faible évolution géomécanique de Moruroa (zones Nord-Est et Sud-Est).

L'atoll de Fangataufa ne nécessite plus de surveillance continue depuis 1996. Une campagne d'observation périodique a été jugée suffisante par l'International Geomechanical Commission (IGC) en 1999. Le suivi des campagnes topographiques de 2001, 2007, 2014 et 2021 confirme la faible évolution géomécanique de Fangataufa.

8. Glossaire

- CEA : Commissariat à l'Énergie Atomique et aux énergies alternatives.
- GPS : Global Positioning System : système américain de Géolocalisation et Navigation par un Système de Satellites (GNSS). La mention GPS est utilisée ici par abus de langage à la place de GNSS.
- DSCEN : Département de Suivi des Centres d'Expérimentations Nucléaires.
- TELSITE : Système de TELésurveillance du SITE de Moruroa.
- DGA : Direction Générale de l'Armement.
- FIL : Forage Incliné Latéral.
- PK : Point Kilométrique défini sur la route qui distribue les installations autour de Moruroa à partir d'un point de référence à l'est de l'atoll.
- VR : Vitesse Relative : indicateur d'évolution géomécanique de l'atoll de Moruroa.

ANNEXE 1 – Analyse de la sismicité en termes d'énergie

Afin d'examiner l'évolution temporelle des niveaux de magnitude de la sismicité de manière continue sur toute la période d'enregistrement couverte par les deux dispositifs successifs du système TELSITE, une magnitude locale M_L est calculée pour chaque évènement (cf. §3.1.2). Une analyse en termes d'énergie libérée est par ailleurs réalisée pour mettre plus distinctement en évidence la contribution des évènements de plus forte magnitude.

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

$$E = 5 \cdot 10^{-5} M_0 \quad (\text{Kanamori, 1977}) \quad (1)$$

où E est l'énergie en erg et M_0 le moment sismique en dyne-cm, déduit de la relation :

$$\log(M_0) = 16,3 + 1,39 M_L \quad (\text{Thatcher et Hanks, 1973}) \quad (2)$$

avec M_L la magnitude locale.

D'autres relations existent pour l'estimation de l'énergie libérée, exprimée notamment à partir de la magnitude de surface M_S (i.e. calculée à partir des ondes de surface) :

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

La relation (3) n'est toutefois pas utilisable telle quelle pour de faibles séismes enregistrés à distance proche. La magnitude de surface M_S y sera assimilée à la magnitude locale M_L . La magnitude M_L est ici calculée à partir des amplitudes déterminées par le système automatique et peut donc différer légèrement des valeurs de magnitude issues d'analyses plus précises.

Les deux formulations (1) et (3) conduisent à des résultats très similaires. À titre d'exemple, le cumul des énergies, appliqué à la zone Française de 1997 à 2017, est compris entre $1,6 \cdot 10^{11}$ et $5,6 \cdot 10^{15}$ ergs avec la relation (1) et entre $9,0 \cdot 10^{10}$ et $5,4 \cdot 10^{15}$ ergs avec la relation (3). La relation (1) de Kanamori (1977) est utilisée dans l'analyse en termes d'énergie présentée dans ce bilan.

Bibliographie

Gutenberg B. and C.F. Richter, Earthquake magnitude, intensity, energy and acceleration, Bull. Seismol. Soc. Am., 46,105-145, 1956.

Kanamori H., The Energy Release in Great Earthquakes, J. Geophys. Res., VOL. 82, NO. 20., 1977.

Thatcher. W., Hanks, T.C., Source Parameters of Southern California Earthquakes, VOL. 78, NO. 35, J. Geophys. Res. Dec.10, 1973.

ANNEXE 2 – Suivi temporel de la situation géomécanique et du niveau de risque de la zone Nord-Est de Moruroa

Afin de suivre au cours du temps la situation géomécanique de la zone Nord-Est de Moruroa et le niveau de risque correspondant, un unique indicateur global sans dimension, nommé vitesse relative VR, est estimé chaque année.

Depuis 1997, il est déterminé à partir des valeurs maximales des cinq types de mesure observées chaque année dans le cadre de la surveillance géomécanique :

- la fréquence des microséismes par semaine,
- les déplacements horizontaux en mm par mois,
- les déplacements dans les forages inclinés en mm/mois,
- les déplacements verticaux en mm/mois,
- l'inclinométrie en mdeg par mois.

Pour chaque type de mesure, le rapport des valeurs maximales mesurées dans l'année avec celles relevées dans le passé définit une vitesse relative (VR). La vitesse relative VR de l'année considérée est la valeur la plus grande de ces cinq rapports.

Une vitesse relative VR = 2 définit la situation pour laquelle la valeur maximale observées dans l'année atteindrait celles associées à un changement d'évolution significatif. Elle correspond à la valeur haute de la gamme des VR généralement observées pendant la période des expérimentations.

Une vitesse relative VR=0,2 correspond à la situation observée à la fin des expérimentations en 1995-1996.

Cet indicateur global est traduit en niveaux de risque, eux-mêmes associés à un délai de préavis vis-à-vis d'un événement de grande ampleur (Tableau 7).

Niveau de risque	Indicateur global "Vitesse Relative"	Situation et risque
Niveau 0	$VR < 2$	Situation normale.
Niveau 1	$2 < VR < 6$	Situation réversible*. Pas de risque immédiat.
Niveau 2	$6 < VR < 12$	Situation réversible*. Préavis supérieur à une semaine.
Niveau 3	$VR > 12$	Situation considérée comme irréversible. Préavis supérieur à 1 jour.

Tableau 7 : Niveaux de risque vis-à-vis d'un éboulement de grande ampleur.

* Le retour d'expérience des mesures effectuées à l'époque des expérimentations souterraines montre que pour des VR < 12, la situation est réversible.

