

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 2022

N°403 DGA/DO/UM NBC/SCEN du 27 septembre 2023
CEA/DIF/DASE/LDG/103/2023/DO (C) du 03 août 2023

Résumé

Ce rapport présente le bilan pour l'année 2022 de l'évolution géomécanique des atolls de Moruroa et de Fangataufa, anciens sites d'expérimentations du Pacifique. Ce bilan est réalisé à partir des mesures continues acquises en temps réel par le système de télésurveillance TELSITE. Les résultats, dans la continuité de ceux des années passées, indiquent des mouvements minimes en accord avec les données de la campagne topographique de 2021, également rappelées dans ce document.

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 2022	11
3.1. SISMICITE.....	11
3.2. DEPLACEMENTS ET DEFORMATIONS EN SURFACE.....	25
3.3. DEPLACEMENTS ET DEFORMATIONS EN PROFONDEUR	34
3.4. ANALYSE EN TERMES DE VITESSES MOYENNES ANNUELLES	47
4. BILAN DE L'EVOLUTION DANS LE SECTEUR SUD-EST (ZONE SIMONE).....	51
5. CAMPAGNE TOPOGRAPHIQUE 2021 : PRINCIPAUX RESULTATS.....	53
5.1. PRINCIPAUX RESULTATS POUR MORUROA	53
5.2. PRINCIPAUX RESULTATS POUR FANGATAUFA	55
5.3. INTERPRETATION POUR LA ZONE NORD-EST DE MORUROA.....	55
6. FONCTIONNEMENT DU SYSTEME TELSITE EN 2022.....	56
6.1. DISPONIBILITES DES MESURES.....	56
6.2. FAITS MARQUANTS ET ACTIONS DE MAINTENANCE	57
6.3. BILAN DU FONCTIONNEMENT DE TELSITE POUR L'ANNEE 2022	58
7. CONCLUSION GENERALE.....	59
8. GLOSSAIRE	60
ANNEXE 1 – ANALYSE DE LA SISMICITE EN TERMES D'ENERGIE.....	61
ANNEXE 2 – SUIVI TEMPOREL DE LA SITUATION GEOMECANIQUE ET DU NIVEAU DE RISQUE DE LA ZONE NORD-EST DE MORUROA.....	62

1. Résumé

Dans le cadre de la surveillance des anciens sites d'expérimentation nucléaire du Pacifique, le suivi de l'évolution géomécanique des atolls de Moruroa et de Fangataufa a été confié au CEA/DAM par le ministère des Armées. 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 2022.

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 2022. 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 2022, 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 géographique de cette microsismicité au sein de la zone Nord-Est ne montre pas d'évolution depuis la fin des expérimentations nucléaires. En surface, 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, menée en 2021, corroborent ces éléments.

Dans la zone Sud-Est, une très faible activité microsismique est reportée pour l'année 2022, dans la continuité de celle précédemment détectée.

Après le ralentissement global observé suite à la fin des expérimentations en 1996, le mouvement à Moruroa, mesurable, est à présent très lent. Les faibles vitesses estimées ne montrent pas de changement de tendance en 2022 par rapport au bilan géomécanique précédent. Ces résultats suggèrent la stabilisation de l'évolution de l'atoll. Celle-ci 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 surveillance s'appuie sur le système TELSITE (TELésurveillance de SITE) qui assure l'acquisition et la réception entièrement automatisées de mesures sur l'atoll. Le dispositif instrumental actuel, opérationnel depuis août 2018, 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 permanent 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'accompagnerait de vibrations qui seraient perçues par les capteurs sismiques installés sur le pourtour de l'atoll. Entre le moment où ces ondes seraient ainsi enregistrées et celui où une vague pourrait déferler sur le platier, il s'écoulerait au moins 90 secondes. Un mur d'environ 13 km côté océan, du PK6 S au PK7 N, protège de telles vagues la partie Est de l'atoll où se situe la base vie. Les personnes hors de cette zone recevraient la consigne de rejoindre les abris en hauteur. Dans une telle éventualité, le système

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

² La poursuite d'une surveillance continue à Fangataufa n'ayant pas été préconisée par l'IGC, le suivi de cet atoll s'appuie sur les campagnes d'observations périodiques.

TELSITE est conçu pour envoyer automatiquement une alerte en direction des personnes présentes sur site et parallèlement, vers les 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.

Dans la suite du document, le terme « alerte » se réfère à ce dispositif de surveillance du risque dit à « 90 secondes ».

La deuxième mission du système de surveillance consiste à apprécier l'évolution géomécanique de l'atoll grâce aux enregistrements des différents capteurs, analysés et interprétés 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. La vague générée pourrait atteindre localement 20 m de haut. La zone protégée par les murs serait partiellement submergée dans sa partie nord-ouest. A plus longue distance, un train de vagues se propagerait vers le 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 vagues sur l'atoll de Tureia, leurs hauteurs seraient comprises entre 1 et 3 m au niveau de son littoral Nord et pourraient submerger la couronne corallienne au niveau du littoral Sud. 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 mesures de protection des personnes seraient prises bien avant l'occurrence du glissement.

Pour évaluer l'évolution géomécanique de l'atoll, les données instrumentales font l'objet, d'une part, d'une étude détaillée des déformations au cours du temps et, d'autre part, d'une analyse plus globale en termes de moyennes annuelles. Celle-ci inclut la synthèse de l'ensemble des mesures sous forme d'un unique indicateur appelé vitesse relative (VR). Cette quantité sans dimension permet 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, d'une part, au suivi de l'activité microsismique et permettant, d'autre part, la mesure des forts mouvements le cas échéant (accéléromètres) ;
- des stations GPS pour la mesure des déplacements en surface, certaines étant utilisées 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.

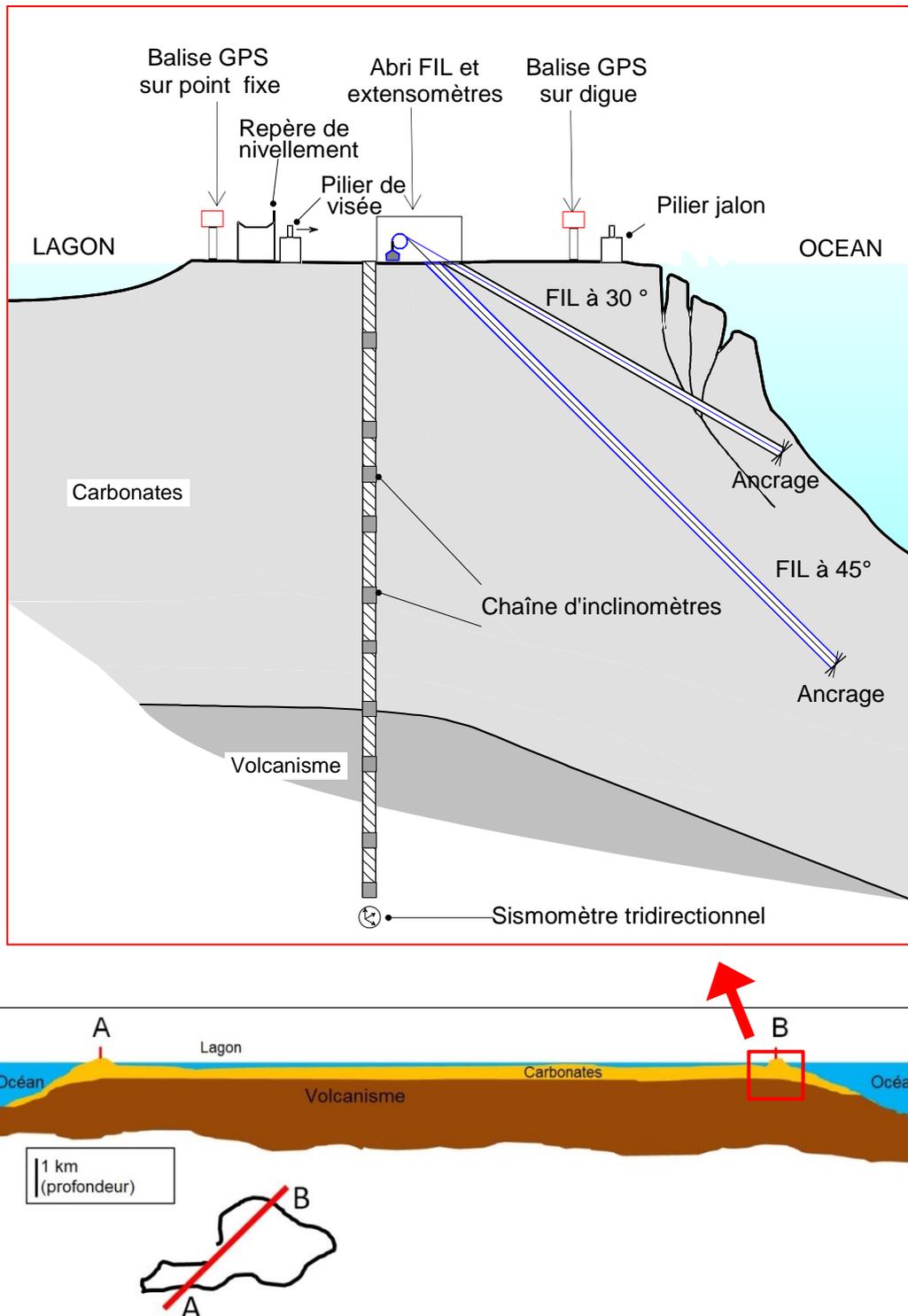


Figure 1 : Schéma de principe (en haut) de l'instrumentation du système de surveillance continue TELSITE. Cette coupe schématique représente les principaux types de mesures réalisées en zone Nord-Est à Moruroa (localisation sur la coupe du bas). Les déplacements en surface sont mesurés par les stations 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.

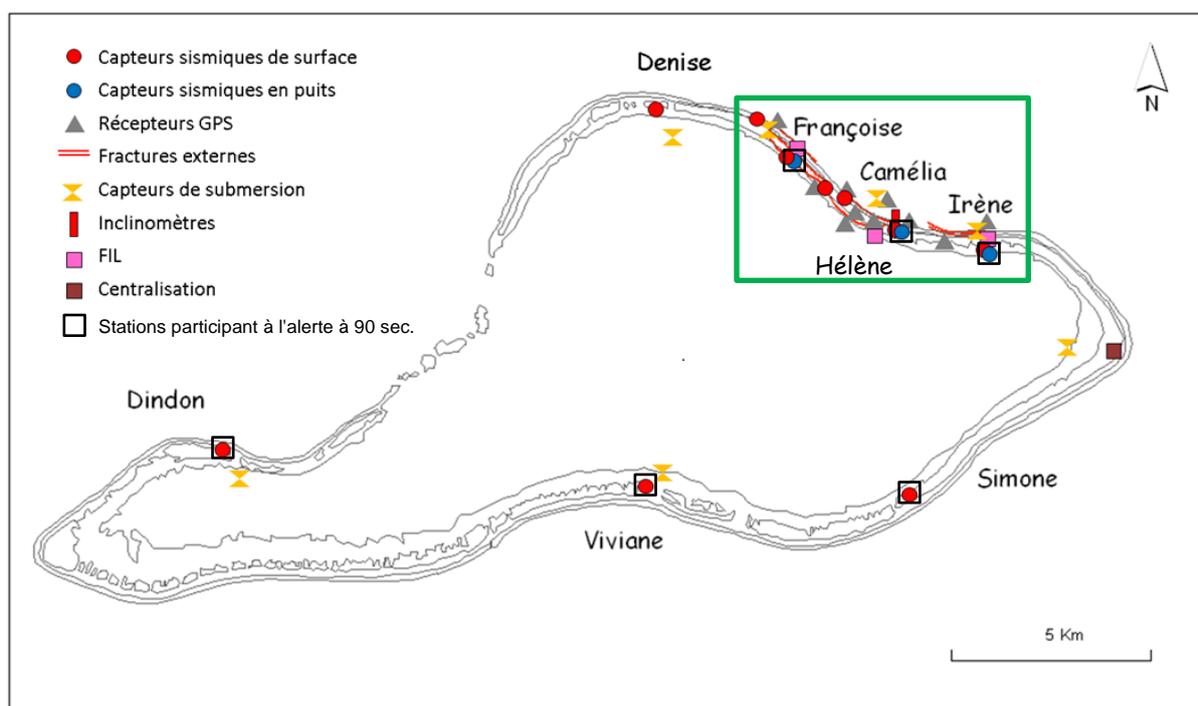


Figure 2 : Implantation de l'instrumentation du système TELSITE. L'encadré en vert est repris en détail dans la Figure 3 ci-dessous. Les capteurs de submersion sont appelés marégraphes dans le texte.

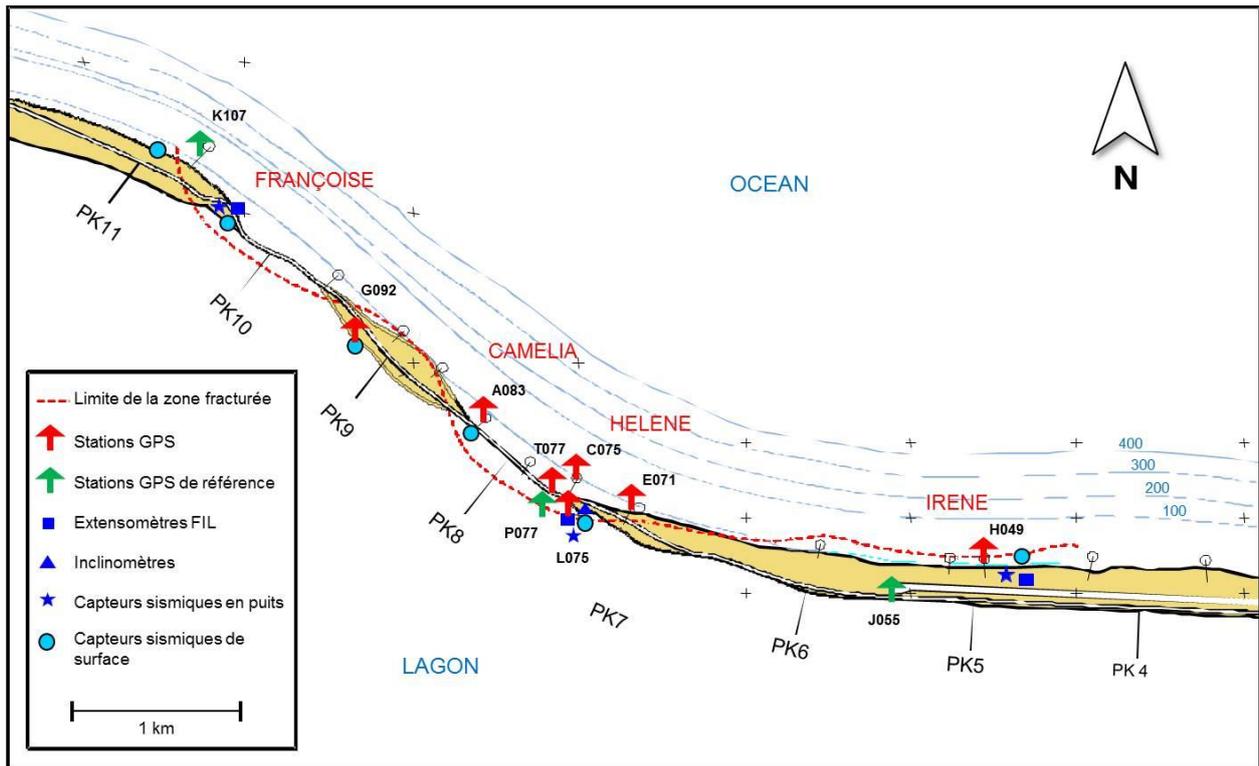


Figure 3 : Détail en zone Nord-Est de l'implantation de l'instrumentation du système TELSITE.

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 2022

L'analyse de l'évolution de la zone Nord-Est pour l'année 2022 s'appuie sur :

- les données des stations sismiques pour examiner la **sismicité**,
- des capteurs GPS pour mesurer les **déplacements en surface**,
- des extensomètres et des inclinomètres implantés en puits pour détecter les **mouvements en profondeur**.

Les données instrumentales de l'année 2022 sont analysées à deux échelles de temps. **Leur évolution est d'une part examinée en détail au cours du temps** afin de détecter d'éventuels évènements ponctuels. Cette analyse fine est menée pour la sismicité (§3.1), les déplacements en surface (§3.2) et les mouvements en profondeur (§3.3). **Les mesures sont d'autre part interprétées en termes de vitesses moyennes annuelles** (§3.4). Cette analyse globale permet notamment de comparer l'évolution actuelle à celle à l'arrêt des expérimentations nucléaires et de synthétiser l'ensemble des données sous forme de l'indicateur global VR (vitesse relative) associé à un niveau de risque d'éboulement de grande ampleur.

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 sont également détectés, de manière occasionnelle, comme des éboulements de volume limité ou des petits glissements de terrain qui peuvent donner lieu à des signaux de plus longue durée et de formes plus complexes.

La répartition géographique des évènements enregistrés en 2022 est tout d'abord présentée au regard de ceux détectés les années passées. L'évolution temporelle de la microsismicité est ensuite décrite depuis 1997 en termes de nombre d'évènements, puis de magnitude et d'énergie libérée.

3.1.1. Répartition spatiale de la sismicité

■ Répartition par secteurs géographiques

La répartition géographique des évènements sismiques⁴ 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

⁴ Certaines localisations ont été ajustées suite à de nouvelles analyses à différentes périodes : en 2005 et 2008 pour des évènements de 2000, 2003 et 2004, et en 2016 pour certains évènements de 2004. Par ailleurs, en 2020, un travail de fusion pour l'élaboration d'une base de données de la sismicité à partir de 1980 a permis de corriger une quarantaine d'évènements comptabilisés deux fois. L'ensemble de ces ajustements sont à l'origine des modifications, non significatives pour l'interprétation, dans les représentations de la microsismicité.

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 Française auquel est associée la station en profondeur proche du PK10 N ;
- le secteur Gisèle-Camélia qui inclut les PK8 N et PK9 N ;
- le secteur Camélia-Hélène, autour du PK7 N, au sein duquel est implantée la station en profondeur de la zone Hélène ;
- le secteur Irène auquel est associée la station en profondeur proche du PK5 N.

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 2022, 38 microséismes ont été détectés en zone Nord-Est par le système TELSITE (Figure 4, points rouges) : 4 en Française, 5 en Gisèle-Camélia, 10 en Camélia-Hélène et 19 en Irène. Aucun n'a déclenché d'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

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 2022 (Figure 5 à Figure 8) confirme une nouvelle fois que l'ensemble des événements reste confiné à l'intérieur ou le long des limites hypothétiques des trois masses superficielles carbonatées en mouvement identifiées en zones Française (PK10 N), Camélia (PK8 N) et Irène (PK5 N). La quasi-totalité des événements détectés en 2022 ont en effet des profondeurs inférieures à 400 mètres. Par ailleurs, 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. Par ailleurs, la proportion d'événements détectés depuis 2018 semble plus importante qu'auparavant ; ce point est discuté plus loin (§3.1.2).

En 2022, 38 microséismes ont été détectés en zone Nord-Est, aucun n'a déclenché d'alerte. Les mesures sismiques enregistrées depuis 2005 n'indiquent 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.

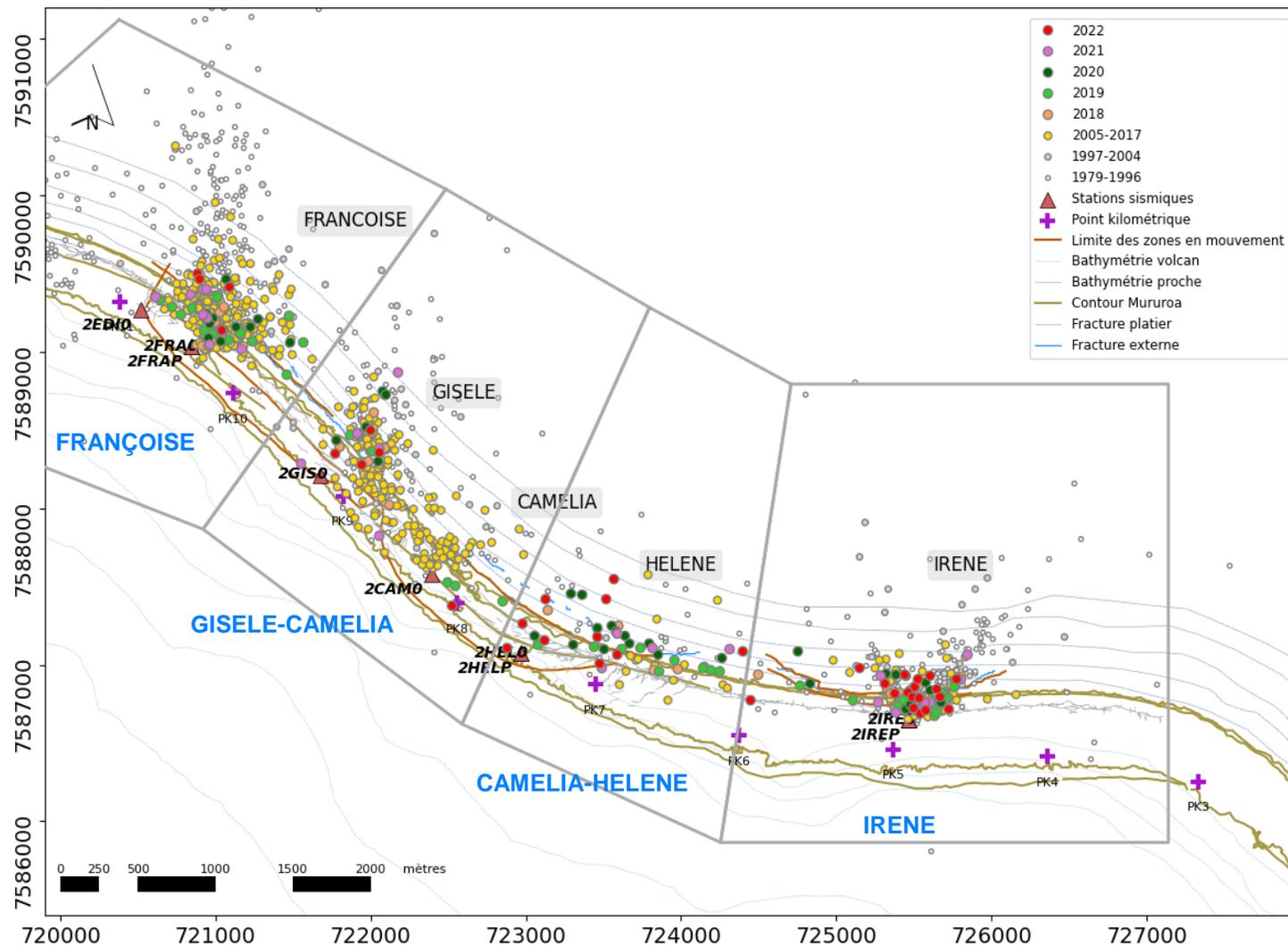


Figure 4 : Historique de la répartition spatiale de la microsismicité en zone Nord-Est (cercles colorés par période) et stations sismiques de TELSITE (triangles) utilisées dans le processus de localisation. Les quatre secteurs (polygones gris) définis pour l'analyse de la sismicité sont notés en bleu. Les points kilométriques ou PK (croix violettes), comptés à partir d'un point de référence à l'extrémité est de l'atoll, servent de repères de localisation.

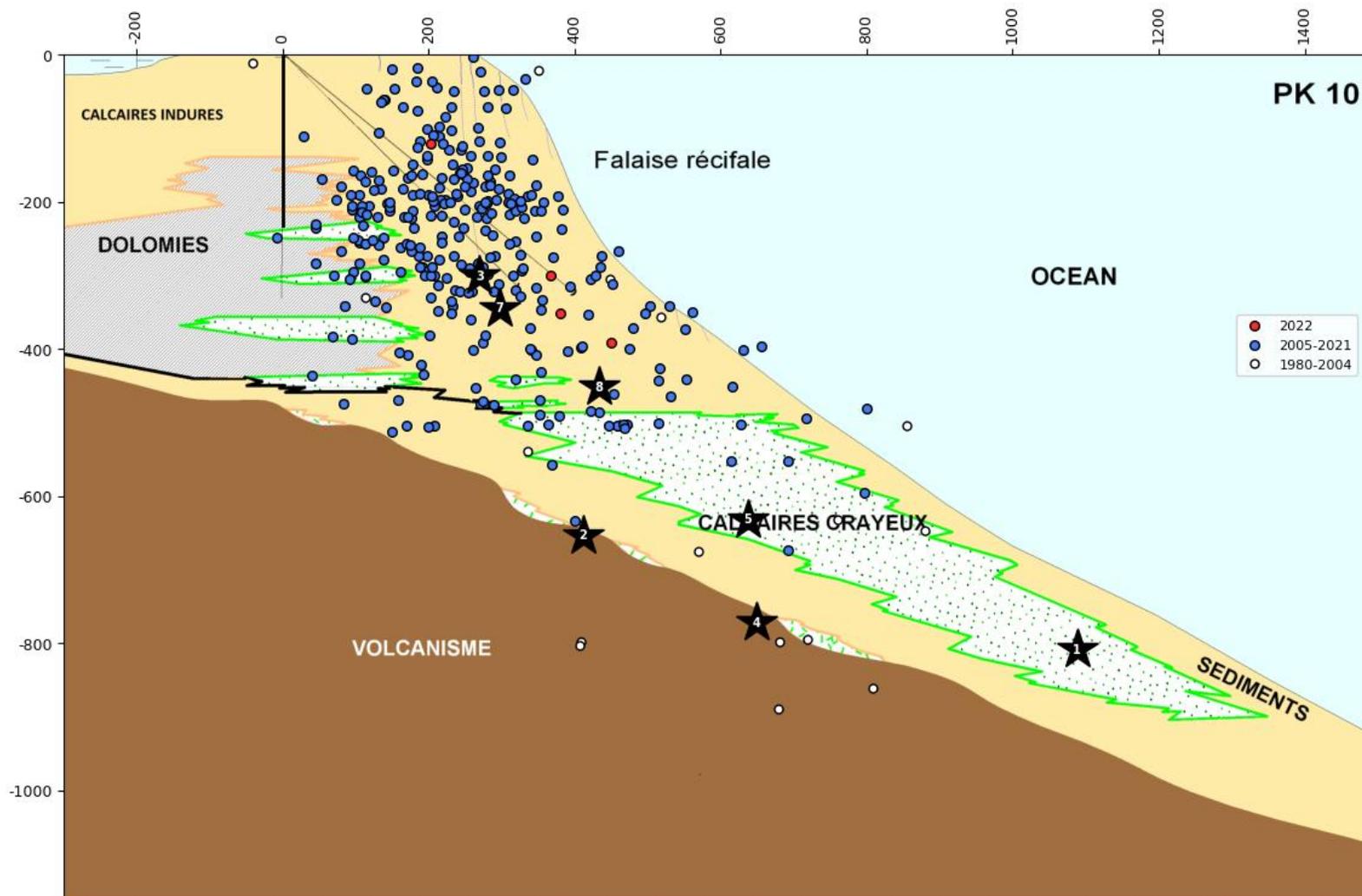


Figure 5 : Projection sur une coupe géologique traversant le secteur Française des hypocentres enregistrés de 2005 à décembre 2022 (cercles colorés par période). Les étoiles noires indiquent les événements ayant déclenché des alertes (1 : 01/04/2003, 2 : 27/11/2006, 3 : 29/11/2006, 4 : 02/10/2006, 5 : 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.

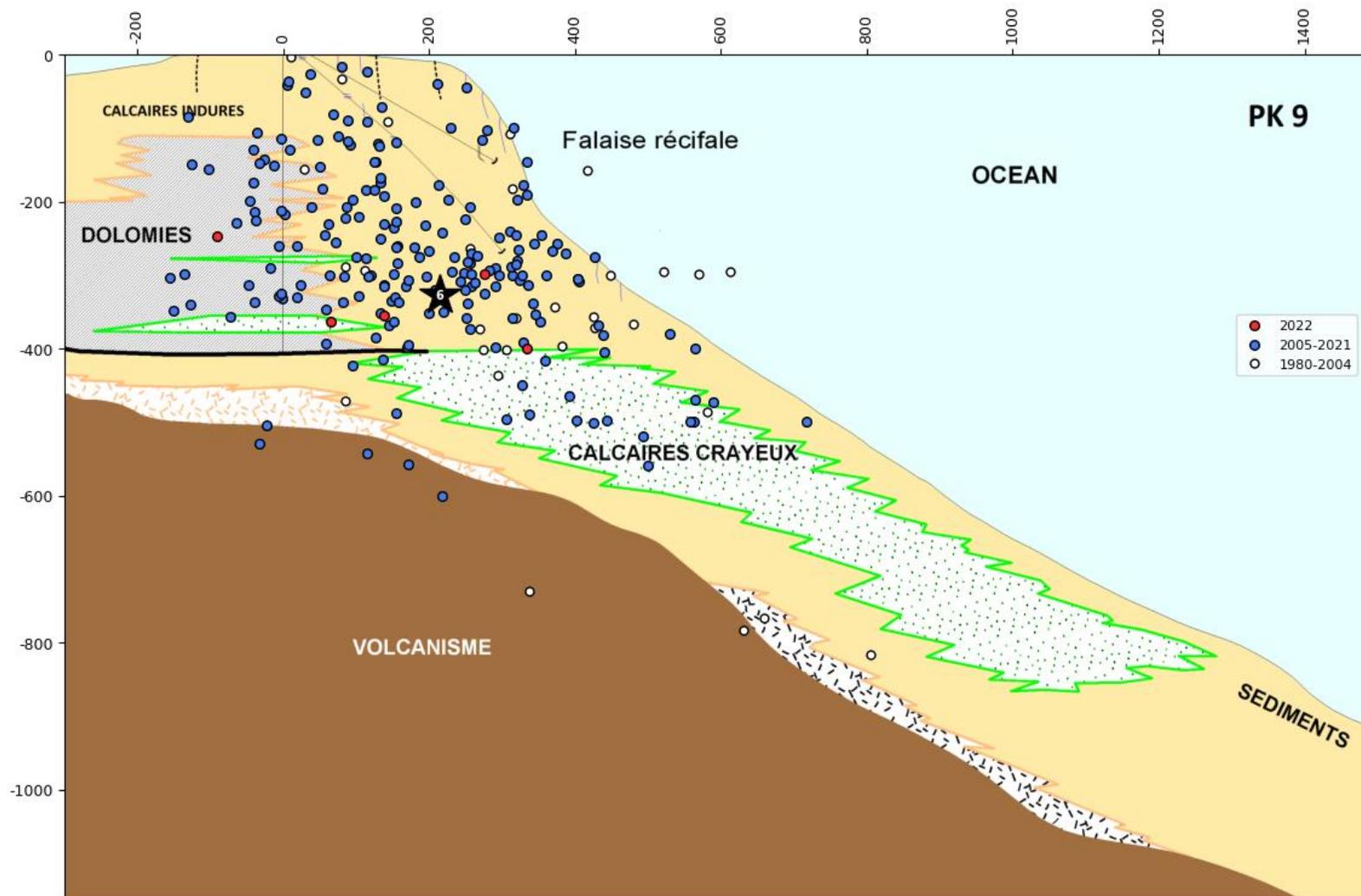


Figure 6 : Projection sur une coupe géologique traversant le secteur Gisèle-Camélia des hypocentres enregistrés de 2005 à décembre 2022 (cercles colorés par période). L'étoile noire indique l'évènement ayant déclenché une alerte (le 11/10/2007).

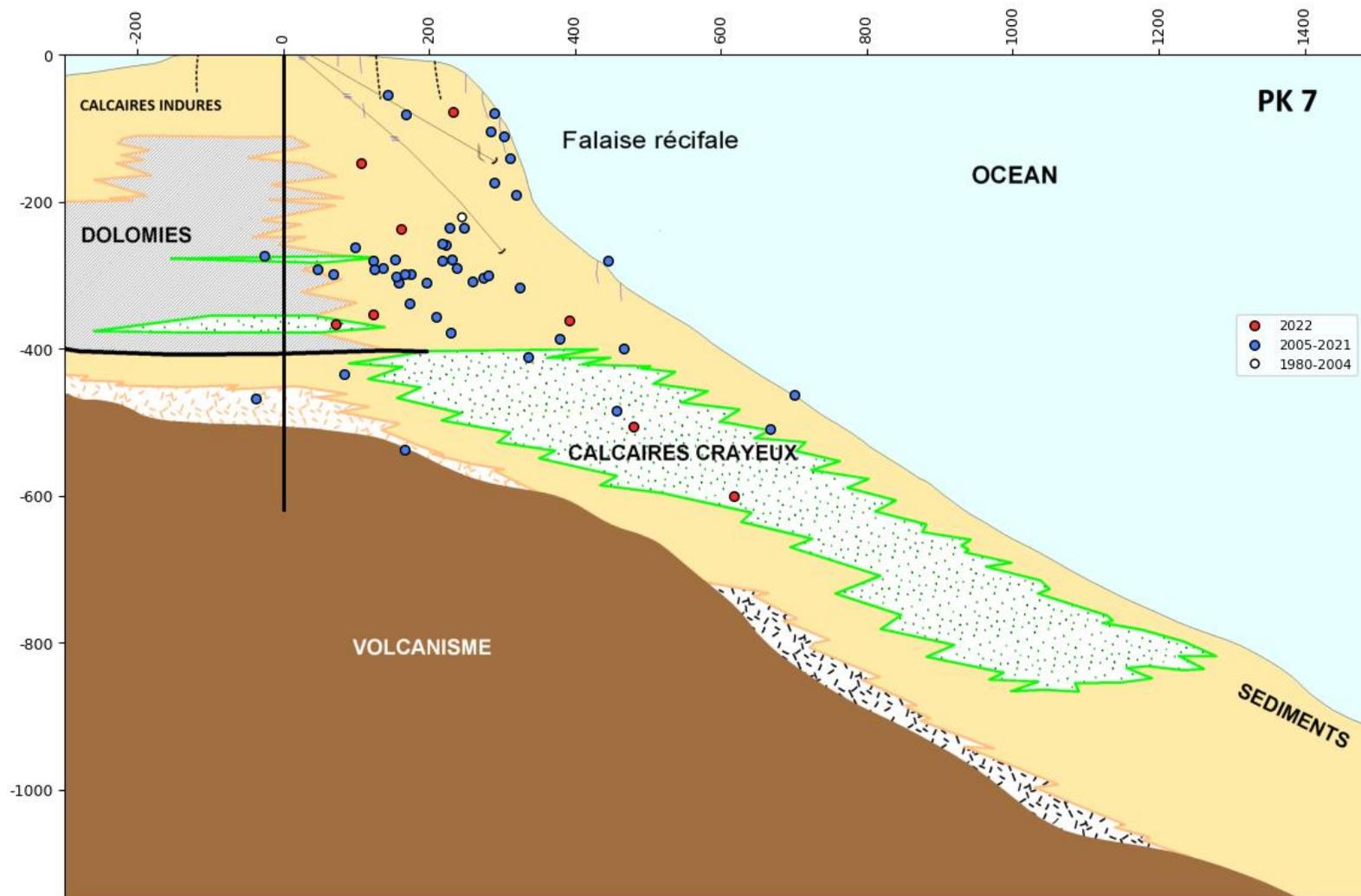


Figure 7 : Projection sur une coupe géologique traversant le secteur Camélia-Hélène des hypocentres enregistrés de 2005 à décembre 2022 (cercles colorés par période). Le puits vertical de l'instrumentation de TELSITE est indiqué par le trait noir vertical.

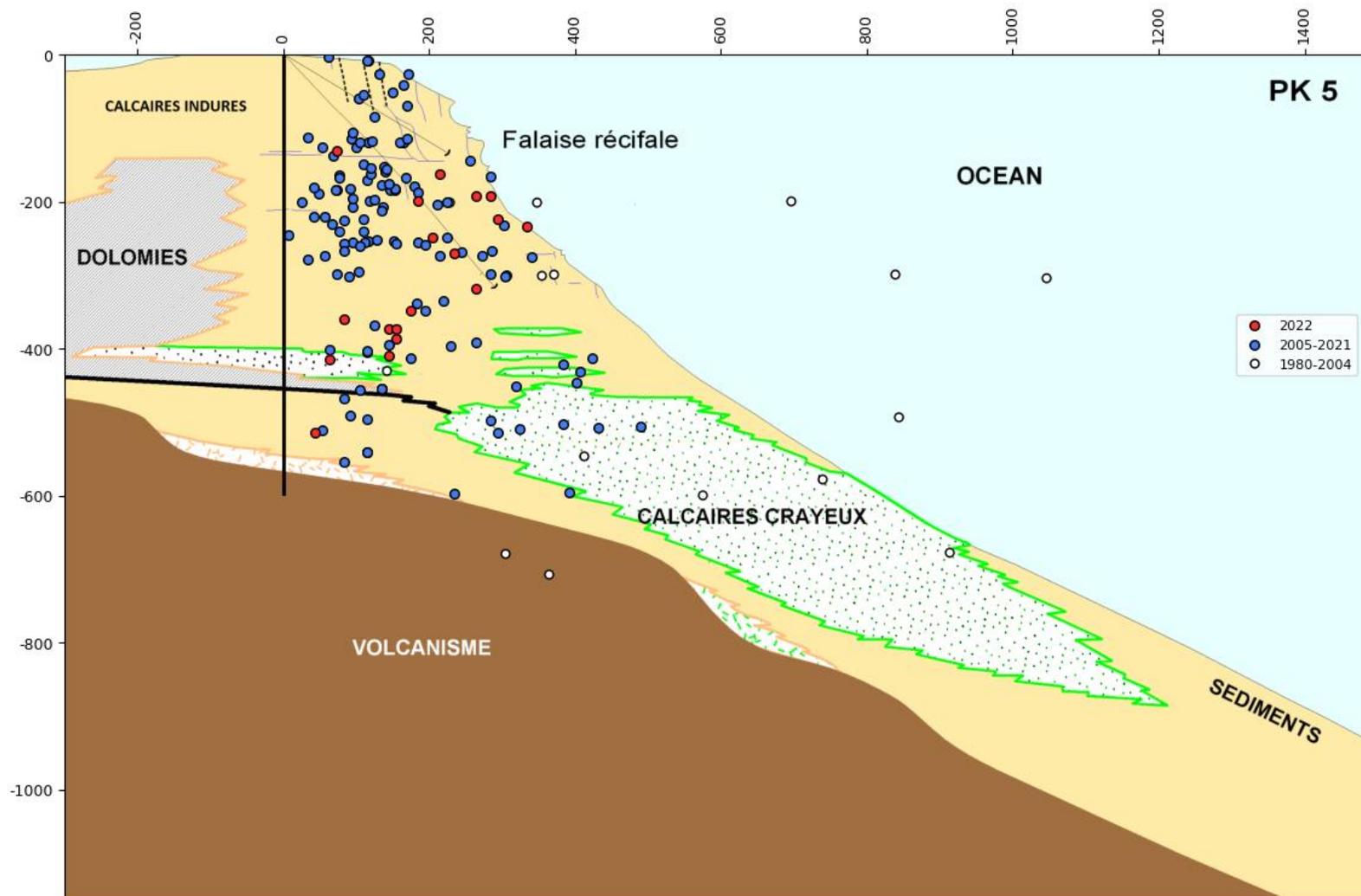


Figure 8 : Projection sur une coupe géologique traversant le secteur Irène des hypocentres enregistrés de 2005 à décembre 2022 (cercles colorés par période). Le puits vertical de l'instrumentation de TELSITE est indiqué par le trait noir vertical.

3.1.2. Evolution temporelle de l'activité sismique

Les 38 microséismes détectés en 2022 représentent une moyenne de 0,73 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 et très inférieur à celui de 10 par semaine associé au passage au niveau 1 de risque d'éboulement de grand ampleur (Tableau 6 et Tableau 1). Ce taux moyen 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 un accroissement en 2017, l'activité microsismique a diminué, elle reste stable et faible en 2022 avec 4 évènements détectés.
- En dehors d'une augmentation en 2017, le taux de microsismicité du secteur Gisèle-Camélia est depuis quelques années à un niveau très faible. 5 évènements ont été enregistrés en 2022.
- 10 évènements ont été détectés dans le secteur Camélia-Hélène en 2022. Avant 2018, très peu d'évènements, moins de cinq par an, parfois aucun, étaient enregistrés dans ce secteur. Depuis 2018, l'activité est toujours très faible, mais le nombre de microséismes est légèrement plus important. Ce changement reflète vraisemblablement une meilleure détectabilité dans ce secteur apportée par la station de profondeur en zone Hélène, 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, 19 évènements ont été enregistrés en 2022. Bien qu'un peu plus élevé que les années précédentes, ce nombre représente toujours une activité microsismique faible, au regard notamment des magnitudes présentées plus loin (§3.1.3).

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 2022, le taux de microsismicité est très faible dans tous les secteurs de la zone Nord-Est ; il est en moyenne de 0,73 évènement par semaine.

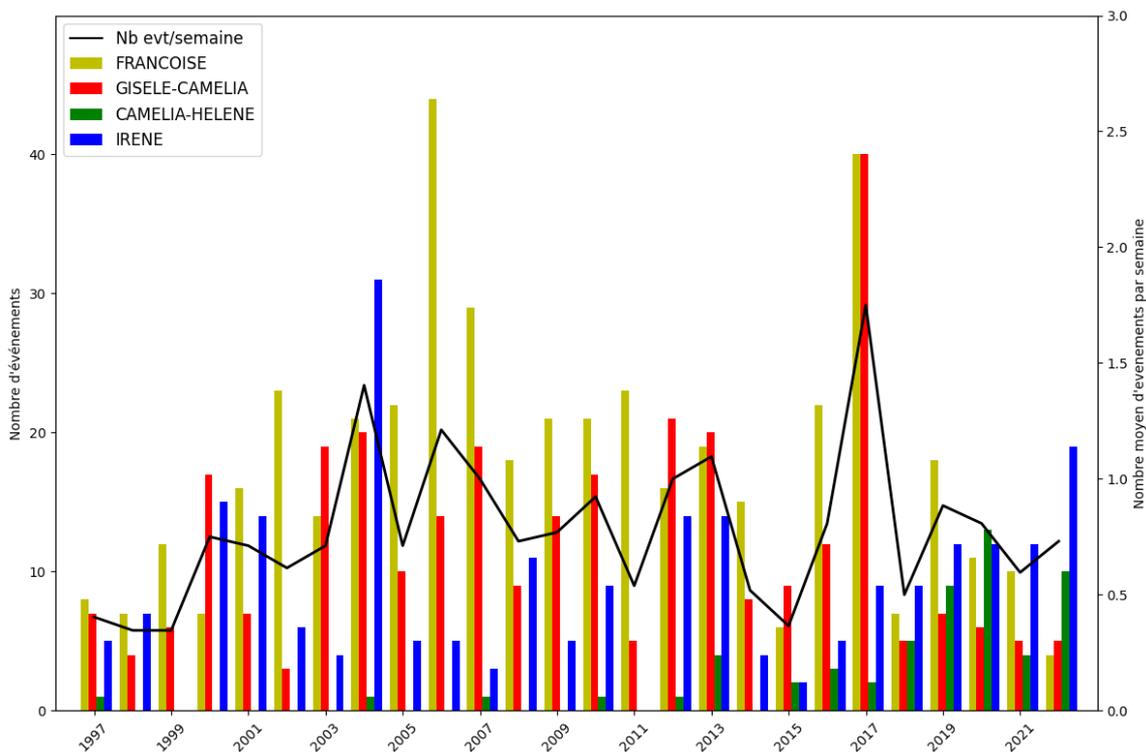


Figure 9 : Evolution temporelle de l'activité microsismique annuelle de 1997 à 2022 pour chacun des secteurs de la zone Nord-Est associés au système TELSITE (barres colorées, axe de gauche) et nombre moyen annuel d'événements par semaine pour l'ensemble du secteur Nord-Est (courbe noire, axe de droite).

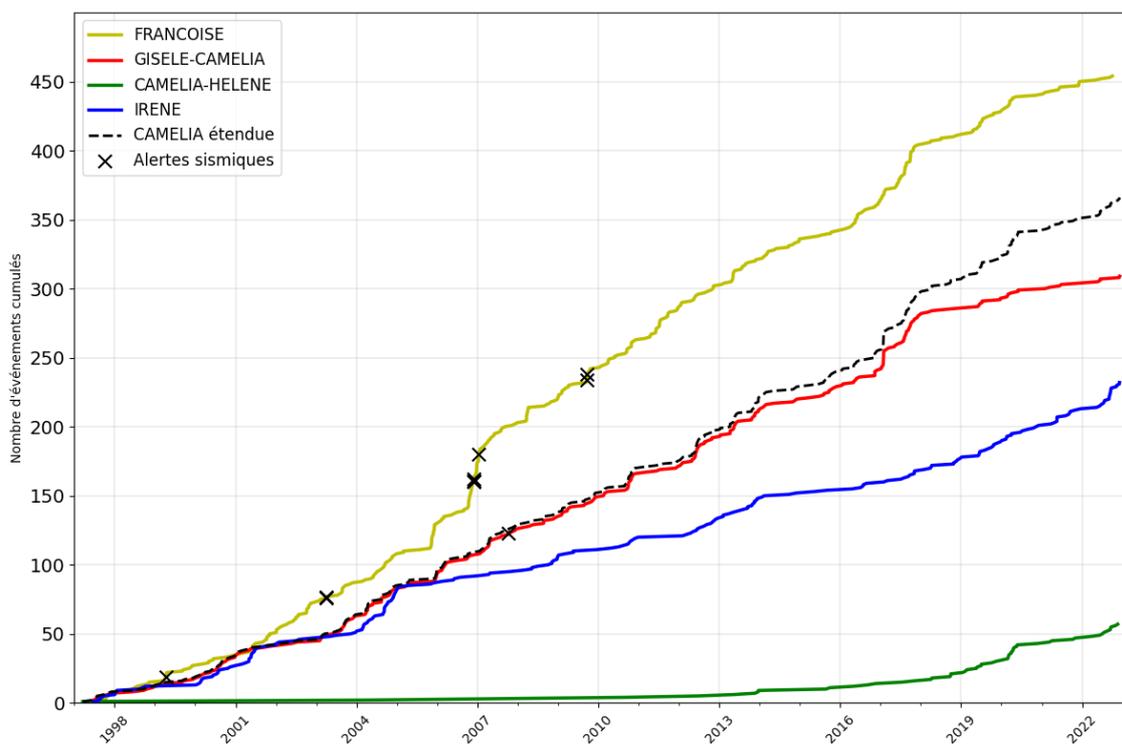


Figure 10 : Courbes du nombre d'événements cumulés de 1997 à 2022 pour chacun des secteurs de la zone Nord-Est. La courbe noire pointillée (Camélia "étendue") représente la somme des contributions des courbes rouge (Gisèle-Camélia) et verte (Camélia-Hélène). Les croix et la courbe sur laquelle elles 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. La magnitude peut ainsi prendre des valeurs négatives pour les faibles amplitudes des plus petits évènements sismiques. 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.

On peut noter, pour référence, qu'en moyenne par an, environ deux séismes de magnitude supérieure à 4 se produisent dans l'ensemble de la Polynésie française, de l'ordre d'un millier de magnitude supérieure à 1, et plusieurs dizaines de milliers de magnitude supérieure à 0.

La gamme de magnitudes M_L des évènements détectés par les systèmes de surveillance de Moruroa depuis 1997 s'échelonne entre -2 et 2,3 pour la zone Nord-Est (Figure 11). Le terme microséisme est utilisé pour rendre compte des faibles magnitudes toutes inférieures à 3 correspondant à des évènements qui peuvent être ressentis jusqu'à une dizaine de km autour de l'épicentre mais ne génèrent pas de dégât. Au-delà de 3, on parle de magnitude modérée, puis de magnitude forte à partir de 5,5 ou 6.

En 2022, peu nombreux, les évènements détectés sont par ailleurs caractérisés par leurs faibles magnitudes, toutes inférieures à 0,7 (Figure 11) ; aucun n'a donc déclenché d'alerte. Dans le secteur Française, après quelques microséismes de magnitude légèrement plus forte en 2021, la microsismicité est à nouveau de très faible intensité en 2022 (Figure 11, points jaunes). En Irène, une seule magnitude se détache des autres en 2022 (Figure 11, points bleus), elle n'excède cependant pas 0,7. La microsismicité reste par conséquent également très faible dans ce secteur. En Gisèle-Camélia et Camélia-Hélène, les magnitudes sont toutes extrêmement faibles, toutes négatives (Figure 11, points rouges et verts).

Sur l'ensemble de la période 1997-2022 (Figure 12, barres bleues), près de 98 % des évènements ont des magnitudes M_L inférieures ou égales à 1.

En 2022 (Figure 12, barres vertes), 92 % des microséismes sont de magnitude inférieure ou égale à 0. Tous les évènements sauf un, soit plus de 97 %, sont de magnitude inférieure à 0,5. Les quelques 3 % restants, obtenus pour les magnitudes entre 0,5 et 1, correspondent à un seul relâchement de contraintes de magnitude 0,68 survenu le 24 juillet 2022 en zone Irène.

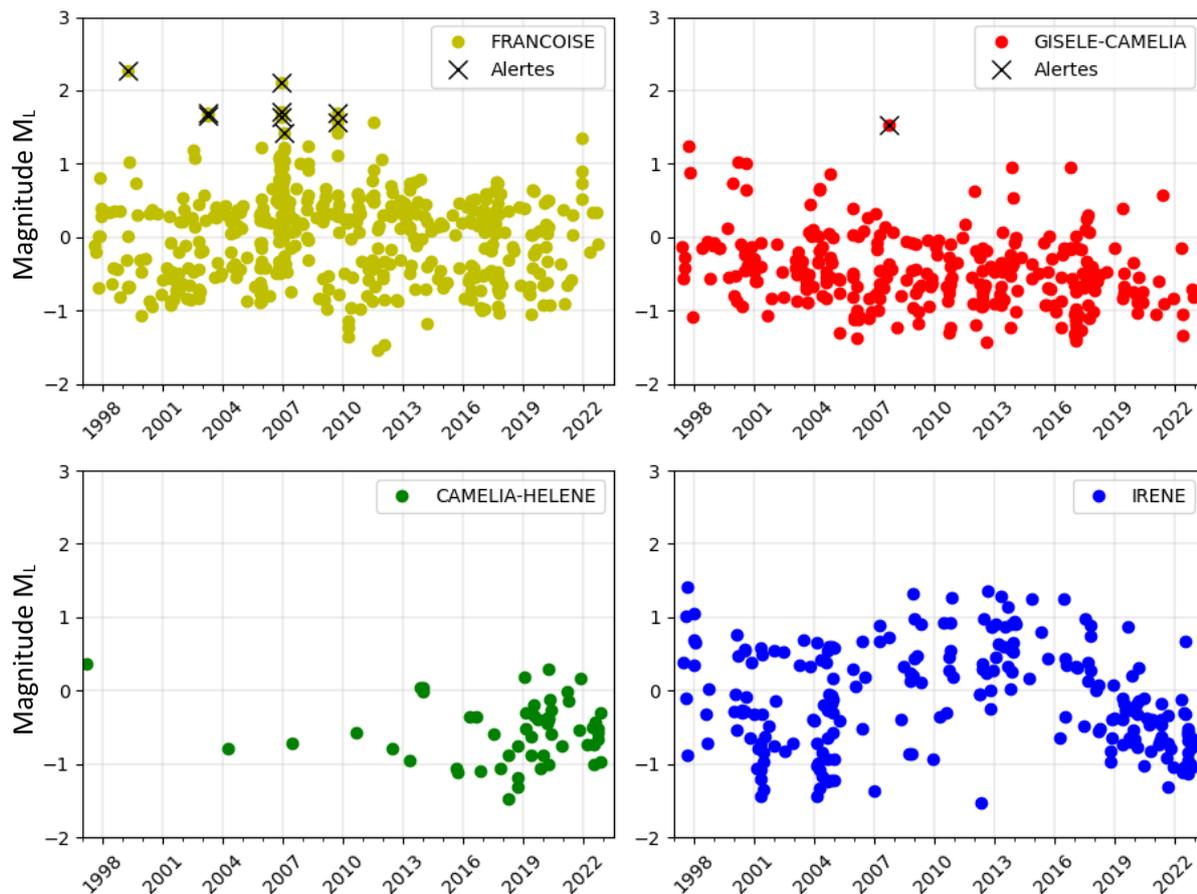


Figure 11 : Distribution temporelle des magnitudes M_L de 1997 à 2022 pour les secteurs Française, Gisèle-Camélia, Camélia-Hélène et Irène.

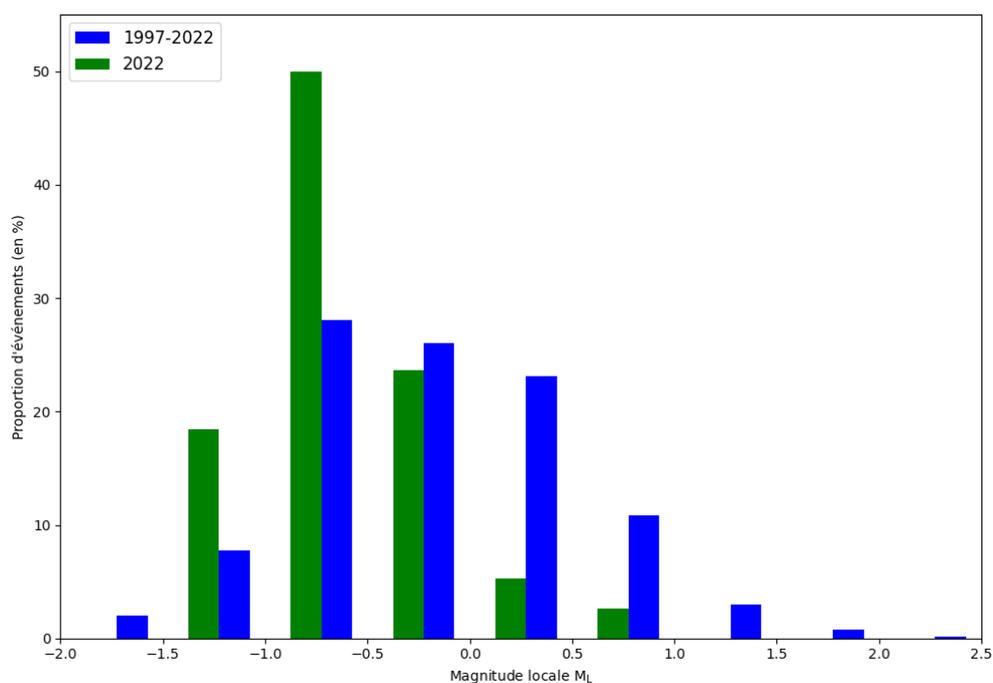


Figure 12 : Distribution de la proportion de relâchements de contraintes, en pourcentage, détectés en zone Nord-Est en fonction de leur magnitude locale M_L sur la période 1997-2022 (en bleu) et sur l'année 2022 (en vert).

La sismicité est examinée en termes d'énergie sismique libérée. Cette énergie est calculée pour chaque évènement grâce à la relation :

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

où E est l'énergie en erg et M_0 le moment sismique en dyn-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 $2,8 \times 10^{14}$ et $1,7 \times 10^{17}$ dyn-cm (soit entre $2,8 \times 10^7$ et $1,7 \times 10^{10}$ N-m) en 2022. Ces valeurs reflètent les très faibles magnitudes relevées.

L'analyse est menée en termes d'énergie cumulée afin de mettre plus nettement en évidence la contribution des évènements de plus forte magnitude au cours du temps. L'augmentation d'un point de magnitude correspond en effet à un gain de l'ordre de trente en énergie. Ainsi, les contributions de chaque évènement sismique sont additionnées aux précédentes au cours du temps pour chacun des quatre secteurs de la zone Nord-Est.

Les courbes ainsi calculées d'énergie cumulée au cours du temps (Figure 13, **Figure 14** et **Figure 15**) montrent des niveaux différents selon les secteurs et une évolution par plateau. Les sauts les plus marqués sont produits par les évènements 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 des discontinuités peu marquées sur les courbes. Sur la **Figure 14** et la **Figure 15**, outre les courbes d'énergie cumulée (lignes continues, axe des ordonnées de gauche), les magnitudes sont également représentées (cercles et losanges, axe des ordonnées de droite) afin d'identifier les évènements à l'origine des sauts en énergie, notamment ceux ayant déclenché des alertes.

- Pour le secteur Française, l'énergie cumulée depuis 1997 est de $5,4 \times 10^{15}$ ergs (Figure 13 et **Figure 14**, courbes jaunes). Cette valeur, la plus importante de la zone Nord-Est, est cependant très faible. Les évènements 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. Depuis 2010, hormis une discontinuité en 2011 et de légères hausses en 2017 et 2021, l'évolution est régulière, en lien avec une activité sismique faible tant en nombre d'évènements qu'en magnitude. L'énergie libérée en 2022 est extrêmement faible, $6,7 \times 10^{12}$ ergs.
- Pour le secteur Irène, le bilan énergétique cumulé depuis 1997 est de $1,2 \times 10^{15}$ ergs (Figure 13 et **Figure 15**, courbes bleues), il reste 4 à 5 fois inférieur à celui du secteur Française. Alors que de 2009 à 2016, des évènements de magnitude M_L supérieure à 1 avaient été enregistrés régulièrement, aucun n'a été détecté depuis 2017. Pour l'année 2022, le nombre de microséismes est légèrement plus important que les années précédentes, mais leurs faibles magnitudes conduisent à une libération d'énergie de $1,1 \times 10^{13}$ ergs. Ce bilan résulte à 80 % du seul évènement de magnitude 0,68.
- Pour le secteur Gisèle-Camélia, l'énergie libérée depuis 1997 reste faible (Figure 13 et **Figure 15**, courbes vertes), elle est de $4,8 \times 10^{14}$ ergs, soit plus de dix fois inférieure à celle du secteur Française. Le bilan énergétique pour 2022 est de $2,3 \times 10^{11}$ ergs.

- Pour le secteur Camélia-Hélène, le bilan énergétique depuis 1997, de $2,3 \times 10^{13}$ ergs, est le plus faible de la zone Nord-Est (Figure 13 et **Figure 15**, courbes rouges), de deux ordres de grandeur inférieur à celui du secteur Française. L'énergie libérée en 2022 est de $1,5 \times 10^{12}$ ergs.

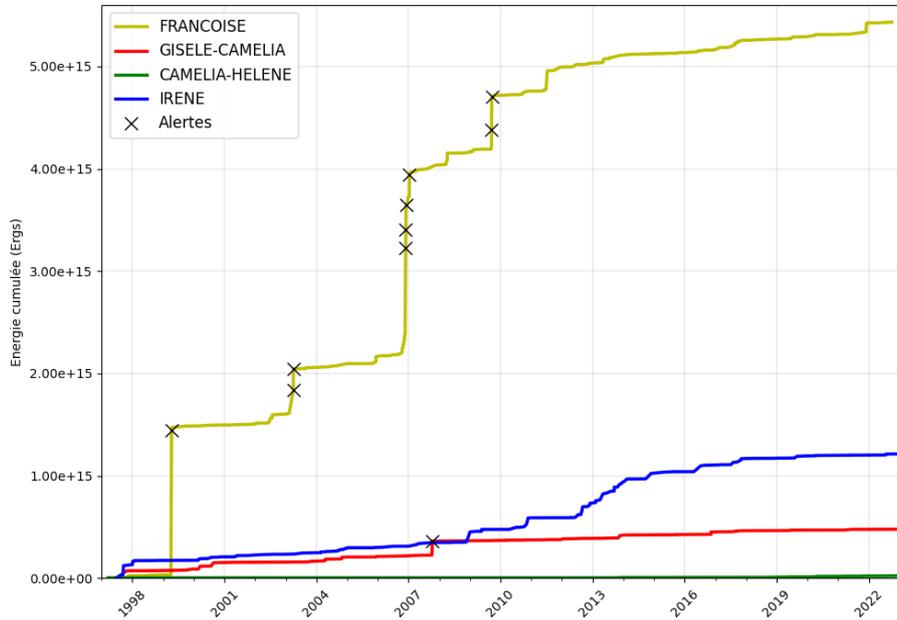


Figure 13 : Comparaison des énergies cumulées de 1997 à fin 2022 pour les quatre secteurs de la zone Nord-Est : Française (en jaune), Irène (en bleu), Gisèle-Camélia (en rouge) et Camélia-Hélène (en vert). Les croix et la courbe sur laquelle elles sont reportées indiquent les dates des microséismes ayant déclenché des alertes et la zone concernée.

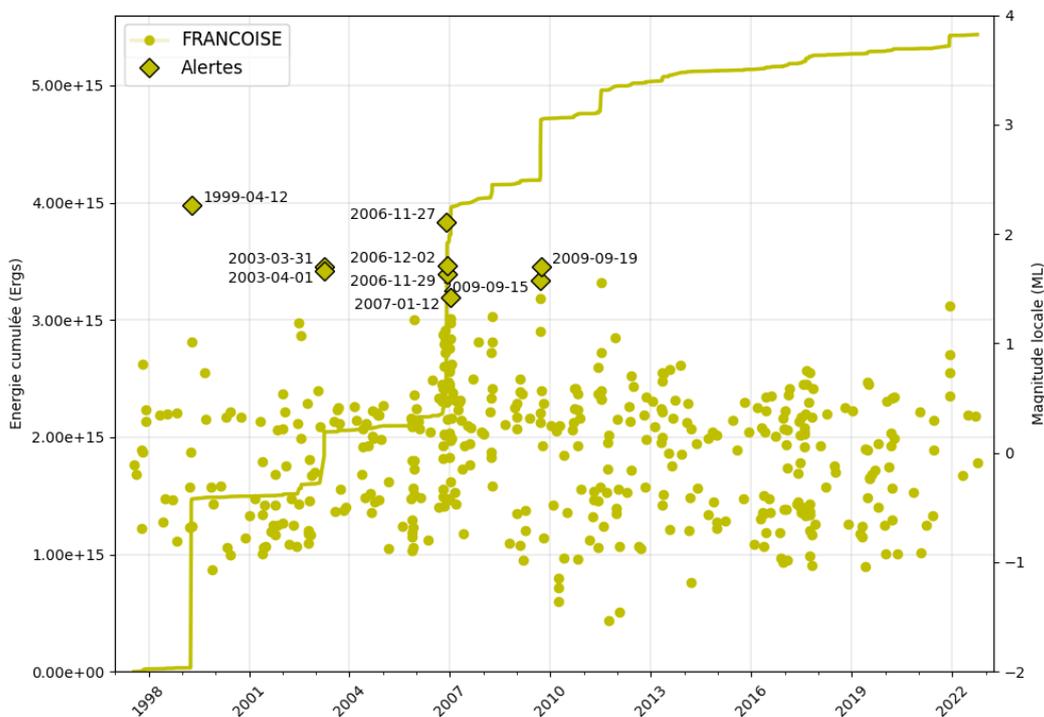


Figure 14 : Energies cumulées (courbes, axe des ordonnées de gauche) pour les événements de 1997 à fin 2022 et magnitudes M_L associées (cercles, axe des ordonnées de droite) de la zone Française. Les losanges étiquetés représentent les magnitudes (axe des ordonnées de droite) des événements ayant déclenché des alertes.

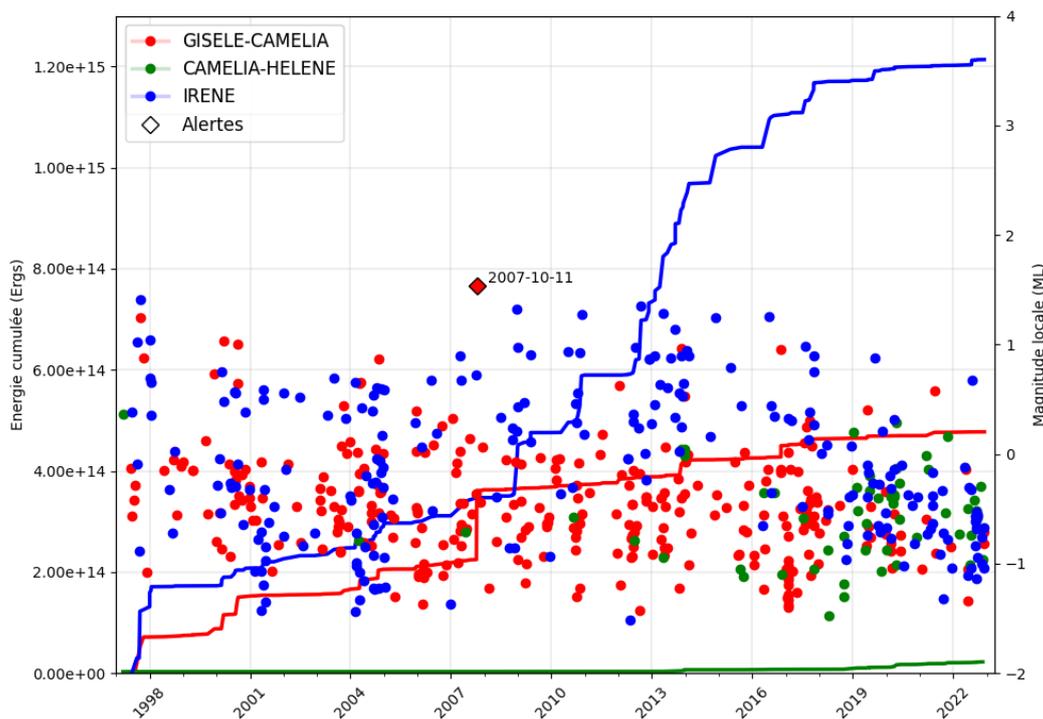


Figure 15 : Energies cumulées (courbes, axe des ordonnées de gauche) pour les évènements de 1997 à fin 2022 et magnitudes M_L associées (cercles, axe des ordonnées de droite) des zones Irène (en bleu), Gisèle-Camélia (en rouge) et Camélia-Hélène (en vert). Le losange étiqueté représente la magnitude (axe des ordonnées de droite) de l'évènement ayant déclenché une alerte en zone Gisèle-Camélia.

En 2022, c'est dans le secteur Irène que l'énergie libérée a été la plus importante. Celle du secteur Française est d'un niveau comparable, celle du secteur Camélia-Hélène est d'un ordre de grandeur inférieure, et celle du secteur Gisèle-Camélia est environ cinquante fois plus faible. Pour l'année 2022, le bilan énergétique est à un niveau très faible dans les quatre secteurs de la zone Nord-Est. Il traduit les très petites magnitudes des évènements enregistrés.

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 par exemple, l'évolution au cours du temps de la ligne de base J055-A083, permet d'évaluer le déplacement relatif d'A083 par rapport à J055 considérée comme fixe. Pour chaque ligne de base considérée, les pentes à long terme, ou tendances, des courbes des composantes horizontales et verticale du déplacement relatif permettent d'estimer les vitesses des déformations permanentes, qui sont l'objet de la surveillance. Cependant, des variations cycliques saisonnières peuvent entacher le calcul des vitesses de déformation permanente ; des travaux tels que Blewitt et Lavallée (2002) ont montré que le biais introduit par les variations saisonnières pouvait être très important pour des durées d'enregistrement inférieures à 2,5 ans et devenait négligeable pour des durées supérieures à 4,5 ans. Le système TELSITE actuel étant en fonctionnement depuis environ 4,3 ans, les vitesses de déformations permanentes sont à présent calculées sur les quatre dernières années, ce qui représente une durée suffisamment longue pour obtenir une estimation

représentative et suffisamment courte pour mettre en évidence une éventuelle modification de vitesse. Ces estimations nécessitent des enregistrements continus sur une durée de quatre ans mais comme détaillé par la suite, certains capteurs ont subi des coupures trop importantes entre 2019 et 2022 pour que leurs vitesses soient évaluées avec fiabilité.

Les vitesses de déplacement, indiquées par la suite, pourront être comparées, à titre indicatif :

- aux vitesses observées en 1996 à l'arrêt des expérimentations nucléaires et représentatives d'une situation normale. Celles-ci sont de 2 mm/mois pour les mouvements horizontaux et de 1 mm/mois pour les mouvements verticaux (Tableau 6 et **Tableau 1**) ;
- aux vitesses correspondant au passage au niveau 1 de risque d'éboulement de grande ampleur. Celles-ci sont de 20 mm/mois pour les mouvements horizontaux et de 10 mm/mois pour les mouvements verticaux (Tableau 6 et **Tableau 1**).

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

Dans l'ancien système TELSITE, 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 avaient permis de caractériser différents mouvements par rapport à JEANNE au sein de la zone Nord-Est :

- La station GPS1, située en zone Hélène, est l'équivalente de C075 sur la digue Charlie-Delta mais est un peu plus proche de la côte. Depuis 1990, la station GPS1 montrait un déplacement, globalement en ralentissement. Pour la période 2015-2018, une composante vers le nord de l'ordre de 0,26 mm/mois et une subsidence, c'est-à-dire un affaissement, de -0,20 mm/mois étaient mesurées. 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 en zone Françoise, 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 mesurés par GPS sont tout d'abord examinés par rapport à la station J055 située en zone stable côté lagon. Lorsque les séries de mesures ne présentent pas de lacunes importantes sur la période 2019-2022, les vitesses moyennes des composantes horizontales et verticales sont estimées sur ces quatre années.

Sur les figures qui suivent, les composantes Est-Ouest, Nord-Sud et verticale des déplacements au cours du temps sont représentées respectivement en rouge, bleu et vert. A titre d'exemple, une pente moyenne positive

de la composante Est-Ouest traduit un déplacement vers l'est, de la composante Nord-Sud un déplacement vers le nord, tandis qu'une tendance négative de la composante verticale indique un mouvement de subsidence, c'est-à-dire un affaissement.

Les signaux des trois stations les plus à l'ouest (Figure 17) indiquent des mouvements faibles :

- J055-K107 : ce sont les mesures les plus bruitées et présentant des variations saisonnières fortes et irrégulières. Par ailleurs, deux périodes de pertes de données (début janvier à fin mars 2022 et début août à début septembre 2022) affectent les séries temporelles des déplacements relatifs. Des interventions sur site ont été nécessaires pour remplacer le capteur le 30/03/22 et remettre en état le dispositif de câblage de la digue Kilo le 08/09/22. La continuité des mesures n'étant pas assurée au cours des quatre dernières années, les vitesses de déformation permanente ne peuvent pas être déterminées de manière fiable sur cette période. **Néanmoins, au vu des données de septembre 2018 à début 2022, l'occurrence d'un mouvement important à long terme est écartée.**
- J055-G092 : **un très faible déplacement vers le nord-est de 0,04 mm/mois est mesuré** sur les quatre dernières années. **La subsidence, très peu perceptible, est de l'ordre de 0,01 mm/mois.**
- J055-A083 : **évalués sur la période 2019-2022, les faibles déplacements vers l'est-nord-est et en subsidence, déjà décelés les années précédentes, sont de l'ordre de 0,09 et 0,08 mm/mois respectivement.** Ces mouvements montrent une tendance en ralentissement par rapport à ceux estimés entre 2016 et août 2018 pour l'ancienne ligne de base JEANNE-ALPHA (0,25 mm/mois vers l'est-nord-est et de 0,2 mm/an en subsidence).

Les mouvements des stations situées à proximité de la zone Hélène, P077, T077, L075 et C075, sont toujours faibles par rapport à J055 (**Figure 18**). Pour les quatre lignes de base, la composante horizontale est essentiellement vers le nord et une faible subsidence est observée. A partir de mars 2022, la station C075, soumise aux effets des tempêtes, a subi plusieurs pannes ayant nécessité des interventions sur site. Son radôme notamment ayant été remplacé à plusieurs reprises au cours de l'année 2022 (fin mars, mi-septembre et fin octobre), les vitesses de cette station ne peuvent pas être calculées sur les quatre dernières années. Seules celles de P077, T077 et L075 le sont :

- La vitesse horizontale par rapport à J055 est d'environ 0,06 mm/mois pour P077, 0,09 mm/mois pour T077, et 0,13 mm/mois pour L075.
- La vitesse de subsidence par rapport à J055 est estimée à 0,07 mm/mois pour P077, 0,08 mm/mois pour T077, et 0,07 mm/mois pour L075.

Les mesures de C075 collectées avant les avaries survenues en 2022 permettent d'estimer sa vitesse par rapport à J055 de septembre 2018 à mars 2022 : **la composante horizontale et la subsidence sont de l'ordre de 0,1 mm/mois.** Ces données montrent un mouvement cohérent avec celui de JEANNE-GPS1, la ligne de base équivalente du dispositif instrumental précédent. **Elles suggèrent par ailleurs que le ralentissement révélé par JEANNE-GPS1 se poursuit après 2018** : la composante Nord de cette dernière était en effet d'environ 0,26 mm/mois et sa subsidence de 0,2 mm/mois sur la période 2015-2018. Il est à noter que cette ligne de base possède les mesures les plus sujettes aux variations saisonnières au sein de la zone

Hélène. Les séries temporelles des déplacements étant relativement courtes, ces perturbations peuvent toutefois biaiser l'estimation des déformations permanentes.

Les enregistrements des deux stations les plus à l'est, E071 et H049, montrent des interruptions en 2020, 2021 et 2022 (**Figure 19**). Exposés aux tempêtes, ces deux capteurs subissent des dégradations nécessitant des actions spécifiques sur site. Dès que celles-ci peuvent être programmées, les équipements arrachés ou endommagés sont remplacés. En conséquence de ces aléas et des délais d'intervention (qui ont été prolongés pendant la crise de la Covid-19), les périodes de données continues sont trop courtes pour calculer de manière fiable les vitesses de déformation permanente de ces deux stations. Les mesures montrent toutefois l'absence de déplacements significatifs par rapport à J055 (**Figure 19**) :

- J055-E071 : les enregistrements exploitables pour évaluer les déformations à long terme s'étendent de septembre 2018 au 8 mai 2021 où une tempête avait arraché l'antenne de E071, et du 11 septembre 2021 à fin 2022. Aucun mouvement global, ni horizontal, ni vertical, n'est détecté sur ces deux périodes. Celles-ci sont cependant trop courtes pour estimer avec fiabilité les déformations permanentes. En l'absence de toute observation le corroborant et de toute intervention à cette date, le saut visible début juin 2020 sur sa composante Nord (indiqué par une flèche sur la Figure 19), de l'ordre de -2 mm, n'est pas interprété comme un mouvement géomécanique. Ce saut doit être dû à un phénomène local (rafale de vent, vague...).
- J055-H049 : H049 est la station la plus régulièrement détériorée par les perturbations météorologiques et océaniques. Ses mesures sont interrompues du 6 juin 2020 au 30 janvier 2021, du 29 mars 2021 au 11 septembre 2021 et du 3 janvier 2022 au 30 mars 2022. Suite à ces aléas, son antenne a été remplacée en mars 2019 (légèrement en retrait de son emplacement initial), en janvier 2021 et en mars 2022. Trop parcellaires pour identifier et estimer de manière robuste des déplacements, les mesures disponibles permettent en revanche d'écarter l'occurrence de déformations permanentes rapides entre mars 2019 et mai 2020 ainsi qu'entre avril et décembre 2022.

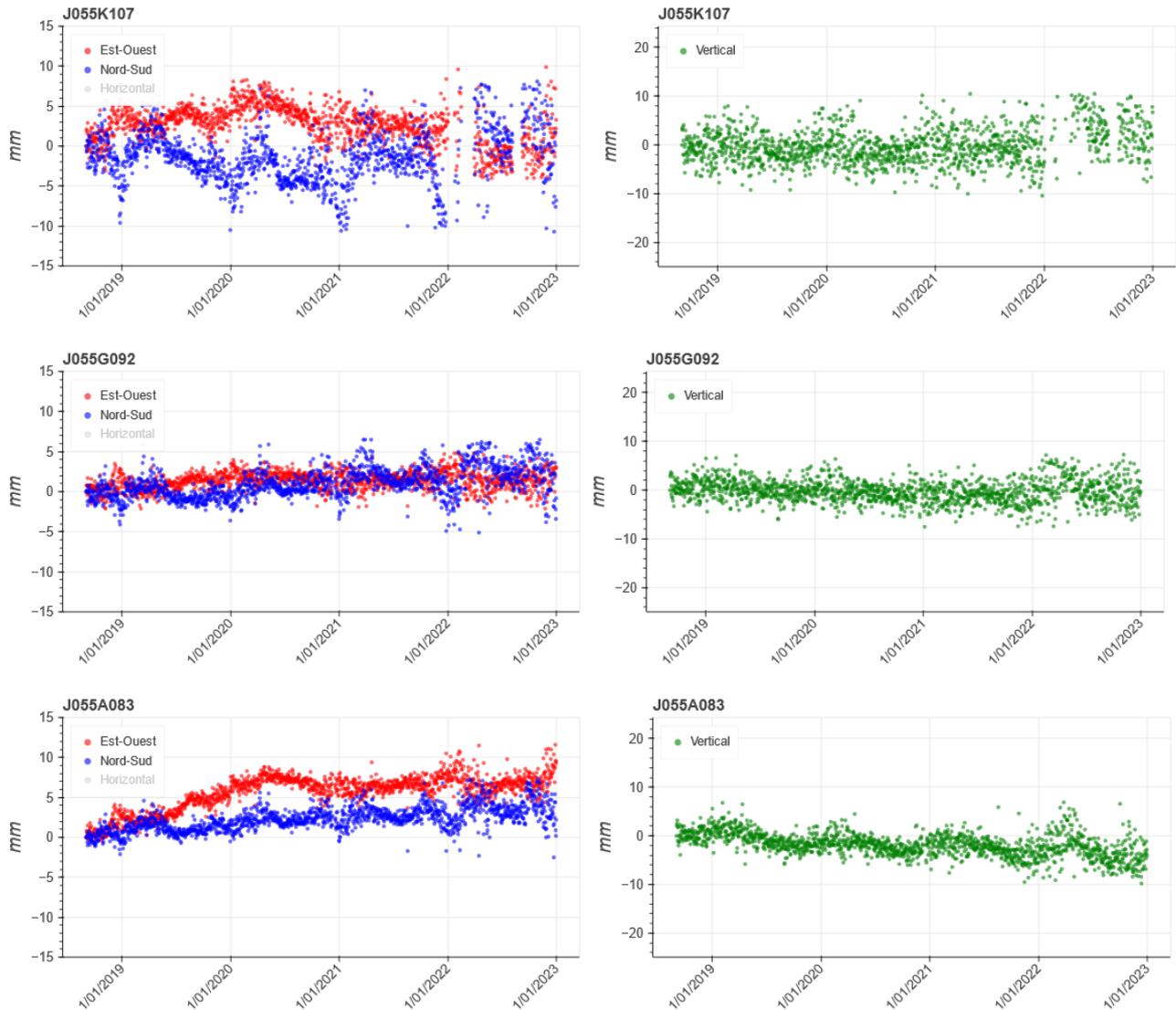


Figure 17 : A gauche, composantes Est (en rouge) et Nord (en bleu), à droite composante verticale (en vert) des déplacements par rapport à la station GPS de référence J055 des stations K107, G092 et A083 de septembre 2018 à décembre 2022.

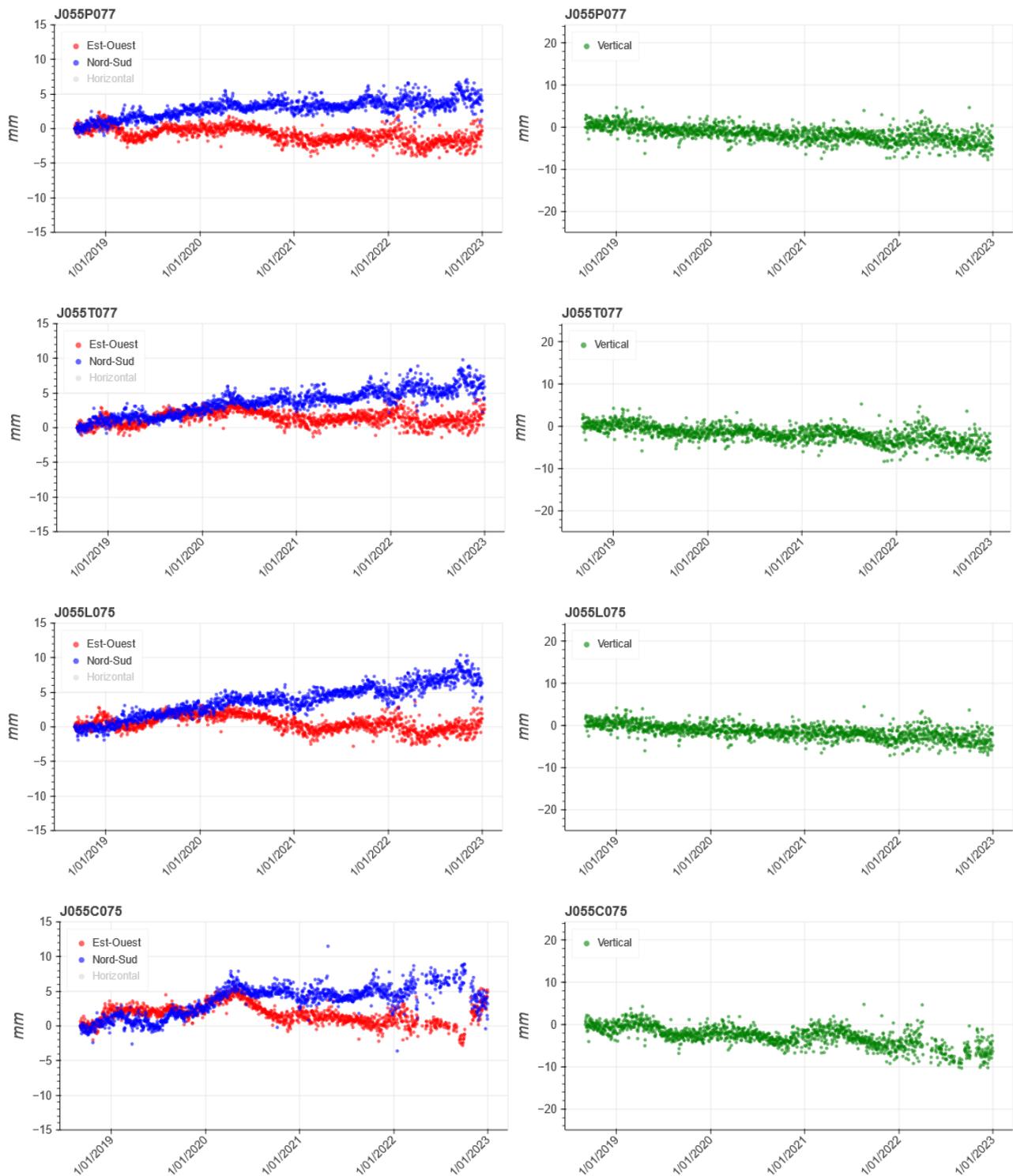


Figure 18 : A gauche composantes Est (en rouge) et Nord (en bleu), à droite composante verticale (en vert) des déplacements par rapport à la station GPS de référence J055 des stations en zone Hélène P077, T077, L075 et C075 de septembre 2018 à décembre 2022.

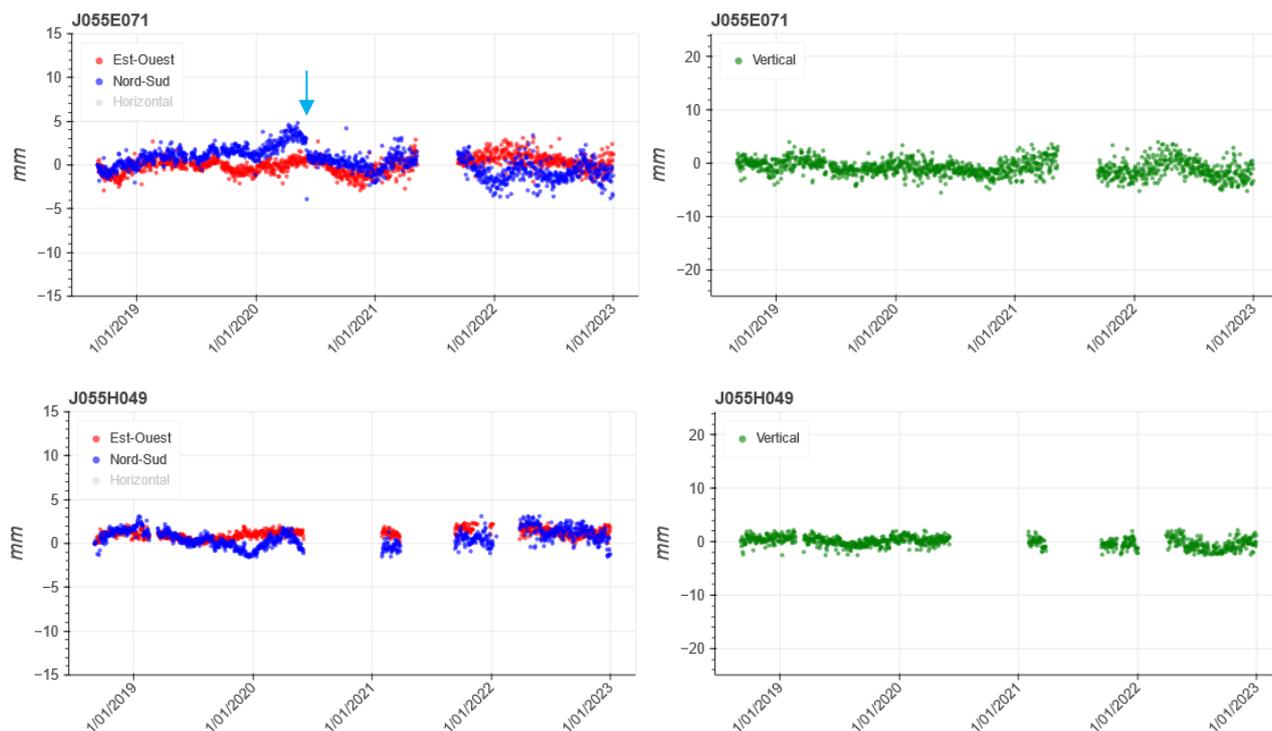


Figure 19 : A gauche composantes Est (en rouge) et Nord (en bleu), à droite composante verticale (en vert) des déplacements par rapport à la station GPS de référence J055 des stations E071 et H049 de septembre 2018 à décembre 2022. La flèche bleue pointe un saut, non expliqué, dans les mesures de la 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 de cette zone. Les déplacements relatifs des trois autres stations qui y sont implantées, T077, L075 et C075, sont représentés sur la **Figure 20** par leurs composantes Est-Ouest, Nord-Sud et verticales, respectivement en rouge, bleu et vert. Ces mesures permettent en particulier d'examiner plus en détail les déformations au sein de ce secteur :

- Les trois stations montrent un très faible mouvement horizontal par rapport à P077, T077 vers le nord-nord-est et L075 et C075 vers le nord.
- Une très légère subsidence est observée pour T077 (environ 0,01 mm/mois), tandis que L075 et C075 ne montrent pas de mouvement vertical appréciable.

Estimées sur les quatre dernières années, les vitesses horizontales de T077 et L075 sont respectivement de 0,04 et 0,07 mm/mois. Celle de C075, évaluée sur la période précédant les coupures en mars 2022, est d'environ 0,03 mm/mois.

Au vu de ces très faibles déplacements par rapport à la station P077, principalement horizontaux, les déformations au sein de la zone Hélène sont infimes et difficilement quantifiables.

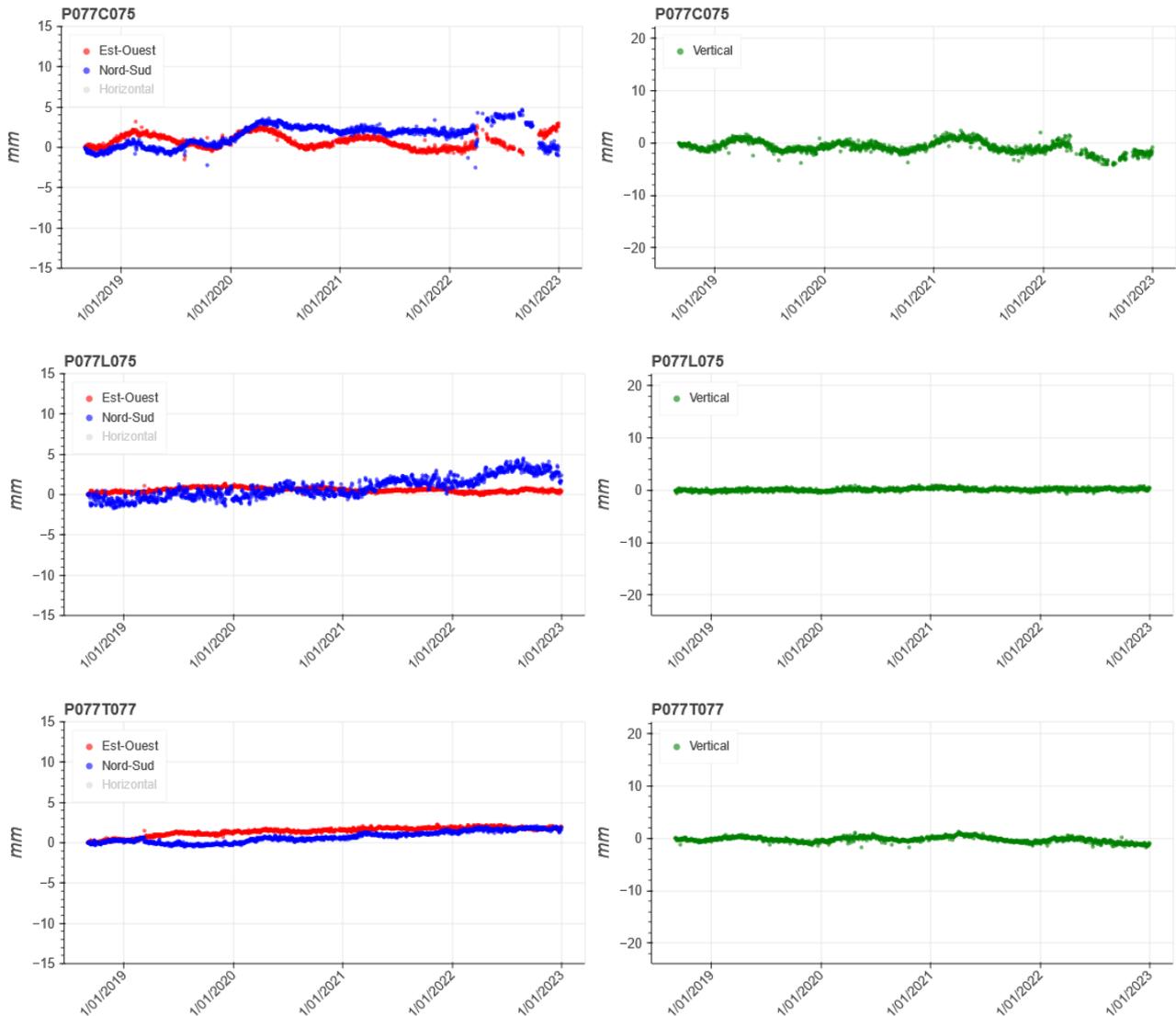


Figure 20 : A gauche composantes Est (en rouge) et Nord (en bleu), à droite composante verticale (en vert) des déplacements par rapport à la station GPS de référence P077 des stations C075, L075 et T077 de septembre 2018 à décembre 2022.

3.2.4. Synthèse des mesures de déplacements en surface

Les données GPS du système TELSITE actuel sont à présent interprétées en termes de déformations permanentes au cours des quatre dernières années. Cette durée est retenue pour permettre le suivi des évolutions futures, tout en palliant les effets des variations transitoires et du bruit affectant les séries temporelles.

Des biais résiduels, variables selon les lignes de base, ne peuvent pas être totalement écartés, d'autant plus que les déformations permanentes sont faibles. Les vitesses de H049, E071, K107 et C075 ne peuvent pas être calculées sur cette période, ces stations ayant subi des coupures entre 2019 et 2022. Les données disponibles permettent cependant de caractériser les déplacements : pour H049, E071 et K107, l'occurrence de mouvements importants est écartée, et pour C075, les vitesses peuvent être estimées entre septembre

2018 et mars 2022. Il faut noter que cette période est plus courte (environ 3,5 ans) et légèrement décalée dans le temps.

Les tendances décelées les années précédentes se confirment :

- Dans les secteurs instrumentés 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. Elles suggèrent que ce mouvement est légèrement plus faible côté lagon et pour les stations les plus à l'ouest. Cependant, les déplacements mesurés étant minimes, les mouvements relatifs sont difficilement appréciables. Une faible composante en subsidence est également détectée.
- Les mesures GPS dans la partie occidentale de la zone Camélia confirment la poursuite de faibles déplacements, vers l'est-nord-est et en subsidence.
- Plus à l'ouest, un déplacement très lent vers le nord-est est détecté en zone Gisèle, tandis que les données en zone Françoise, particulièrement bruitées, écartent la possibilité de mouvement important.

Les données GPS excluent l'occurrence de déformations importantes ou rapides pendant la période de mesure et indiquent que les mouvements sont faibles. Les déplacements estimés sont cohérents avec ceux déduits des mesures GPS antérieures à 2018. Ils suggèrent, après le ralentissement observé à la fin des expérimentations nucléaires, une stabilisation de l'évolution en surface.

3.3. Déplacements et déformations en profondeur

Dans les 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 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 au fond d'un forage et mis en tension à la surface à l'aide de poulies et de contrepoids. Elles ont pour objectif de détecter les mouvements des terrains en profondeur, par rapport aux plateformes de surface où sont situées les têtes de forage. En se déroulant, le câble permet de mesurer l'éloignement (déplacement positif) entre le point d'ancrage et la surface.

Les caractéristiques du dispositif ancrage-câble-capteur sont les suivantes :

- l'«Inconel 625» a été retenu comme matériau de l'âme centrale porteuse (câble) pour sa résistance particulière à l'environnement corrosif marin. Cette âme, constituant l'élément mécanique proprement dit, doit être légèrement tendue pour reproduire en surface le déplacement de l'ancrage en fond de forage ;

- la mesure du déplacement 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 permet le déplacement de cette dernière avec un minimum de frottements ;
- les extensomètres du système TELSITE sont adaptés aux déplacements minimes actuels, inférieurs à 1 cm/an, vitesse si faible qu'elle est 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. Le codeur optique a une résolution de 50 μ m. En intégrant les facteurs pouvant influencer sur la dilatation du câble (variations de température, marées, ...), la résolution du dispositif peut être estimée de façon conservative en deçà du dixième de millimètre. Cette valeur est largement suffisante pour détecter des changements significatifs de tendance.

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

Les vitesses, indiquées par la suite, des déplacements mesurés dans les FIL pourront être comparées, à titre indicatif, à la vitesse de 2 mm/mois observée en 1996 à l'arrêt des expérimentations nucléaires et représentative d'une situation normale et à celle de 20 mm/mois correspondant au passage au niveau 1 de risque d'éboulement de grande ampleur (Tableau 6 et Tableau 1).

Lors de la refonte du système de surveillance, l'instrumentation de la zone Camélia n'a pas été renouvelée mais a été transférée en zone Hélène afin de mieux répondre aux objectifs de la surveillance géomécanique. **Les FIL du dispositif de surveillance précédent étaient situés en zones Irène, Camélia et Françoise.**

Les mesures utilisables d'extensométrie suivaient le plus souvent des évolutions par paliers et, avant leur arrêt 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 entraînant 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 à nouveau été 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, les très faibles déplacements montrent la stabilisation du dispositif. Le saut visible le 1^{er} avril 2022 a été généré par la sollicitation manuelle prévue dans le cadre de la maintenance. Depuis, l'évolution très faiblement croissante, de l'ordre de 0,01 mm/mois, suggère que le câble est désormais en tension.

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. Un petit mouvement de 0,6 mm est enregistré en août 2022, il a lieu essentiellement du 11 au 14, ce qui représente une vitesse de 4,5 mm/mois pendant quatre jours seulement. Cette valeur reste très inférieure aux 20 mm/mois associés au passage au niveau de risque 1. Ce bref mouvement ne coïncide avec aucun autre indicateur ou évènement et n'a pas modifié l'évolution à plus long terme du câble. L'absence de données du 2 février au 8 mars 2019 correspond à une période de dysfonctionnement du codeur.

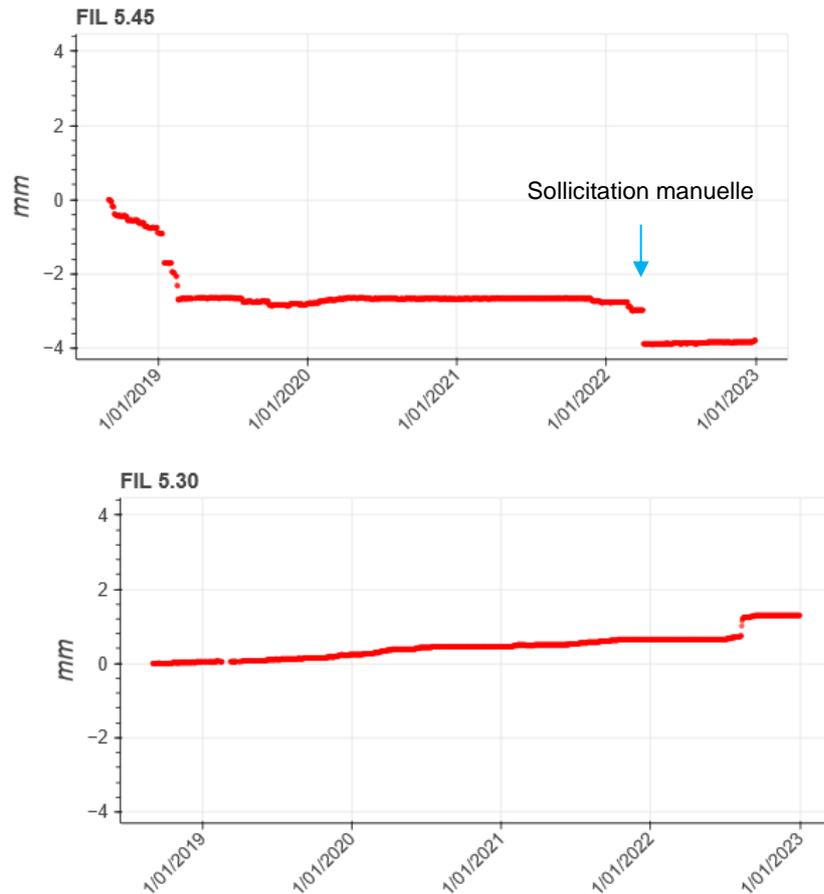


Figure 21 : Déplacements mesurés de septembre 2018 à décembre 2022 par les câbles implantés en zone Irène dans les forages inclinés de TELSITE, en haut, à 45° et, en bas, à 30°. La flèche bleue indique le saut généré par la sollicitation manuelle appliquée en avril 2022 dans le cadre de la maintenance.

En zone Hélène, 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 que la mise en tension des câbles n'est pas encore effective. 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. Ces actions, dont l'effet est visible sur les deux courbes, ont contribué à la mise en tension des câbles sans pour autant confirmer leur tension. Des sollicitations manuelles ont été réalisées en avril 2022 mais la lente évolution négative qui a repris ensuite suggère que leur stabilisation est toujours incomplète. Malgré tout, les deux extensomètres seraient en mesure de détecter des mouvements importants s'ils devaient se produire. Et même s'ils sont difficilement mesurables, les mouvements sur les FIL de la zone Hélène depuis fin 2018 sont faibles. Cela est confirmé par **les mesures GPS (§3.2.3), sismiques (§3.1) et inclinométriques (§3.3.2) qui permettent de conclure à une situation normale en zone Hélène.**

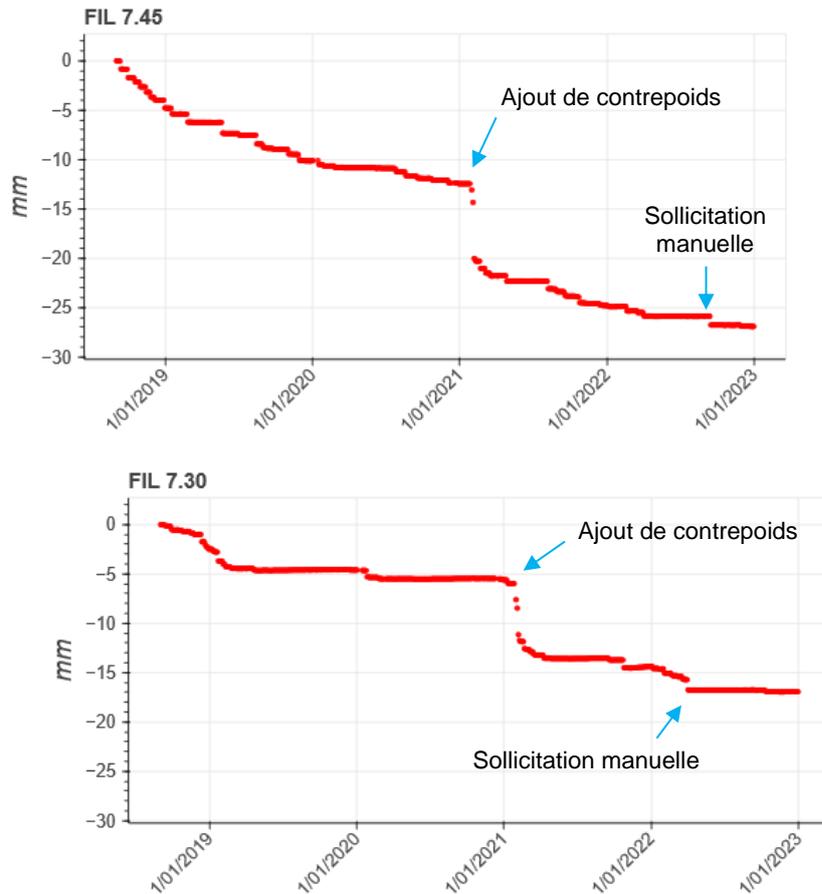


Figure 22 : Déplacements mesurés de septembre 2018 à décembre 2022 par les câbles implantés en zone Hélène dans les forages inclinés de TELSITE, en haut, à 45° et, en bas, à 30°. Les flèches bleues pointent les brusques déplacements générés en février 2021 par l'ajout de contrepoids et en avril 2022 par la sollicitation manuelle pour favoriser la stabilisation des deux FIL.

En zone Française, les déplacements du FIL 10.45 (Figure 23) ont légèrement décliné au démarrage du système jusqu'à fin 2018, tandis qu'une évolution faiblement croissante a été enregistrée dès le départ par le FIL 10.30.

Une panne a interrompu l'enregistrement des mesures du FIL 10.30 pendant environ deux mois début 2019 et celui du FIL 10.45 de mi-février 2020 à mi-juillet 2020. En dehors de ces lacunes, les deux extensomètres ont suivi depuis 2020 des évolutions globalement concordantes jusqu'à fin novembre 2022. Ces évolutions sont faiblement croissantes et avec un léger ralentissement au cours de l'année 2020. Ainsi, depuis juillet 2020 et jusqu'à fin 2022 pour le FIL 10.45 et d'avril 2020 à fin novembre 2022 pour le FIL 10.30, les mesures disponibles indiquent des vitesses n'excédant pas 0,01 mm/mois. Une légère accélération, de l'ordre de 0,2 mm/mois au maximum, est enregistrée uniquement par le FIL 10.30 à partir du 24 novembre 2022.

Pour l'ensemble des mesures, les phases mineures et très brèves d'accélération correspondent à des vitesses n'excédant pas 0,3 mm/mois.

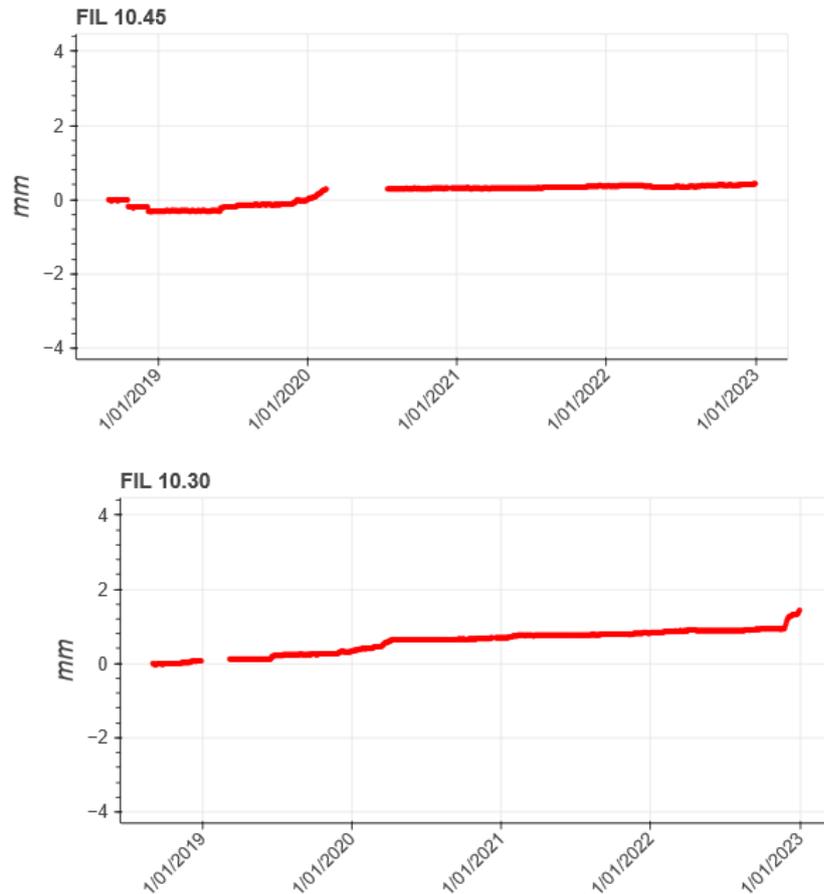


Figure 23 : Déplacements mesurés de septembre 2018 à décembre 2022 par les câbles implantés en zone Française dans les forages inclinés de TELSITE, en haut, à 45° et, en bas, à 30°.

■ Synthèse des mesures dans les FIL

Dans les trois zones équipées de FIL, les quarante mois de mesures extensométriques (de septembre 2018 à décembre 2022) ne montrent pas de mouvements importants des terrains où sont ancrés leurs câbles. Les évolutions à long terme n'excèdent pas 0,02 mm/mois. A plus court terme, des phases de légère accélération sont enregistrées en zone Française sur de courtes périodes, début 2020 par les deux FIL et fin 2022 par le FIL 10.30, leurs vitesses n'excèdent pas 0,3 mm/mois et 0,2 mm/mois respectivement. Un mouvement de faible amplitude (0,6 mm) est détecté sur quelques jours en août 2022 par le FIL 5.30 en zone Irène.

Les très lentes évolutions à long terme et les quelques épisodes d'accélération, courts et limités en amplitude, indiquent l'absence de mouvements significatifs en profondeur, en cohérence 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 comme la poursuite de la mise en tension des câbles. À ce jour, bien que la décroissance de leurs mesures se soit globalement atténuée, les dispositifs des FIL 7.30 et 7.45 en zone Hélène ne sont

pas totalement stabilisés malgré l'ajout de contrepoids début 2021 et des sollicitations manuelles de 2022 pour favoriser la mise en tension. Cependant, les deux extensomètres seraient en mesure de détecter des mouvements importants s'ils devaient se produire.

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

Les vitesses, indiquées par la suite, des rotations mesurées par les inclinomètres pourront être comparées, à titre indicatif, à la vitesse de 0,2 mdeg/mois observée en 1996 à l'arrêt des expérimentations nucléaires et représentative d'une situation normale, et à celle de 4,6 mdeg/mois correspondant au passage au niveau 1 de risque d'éboulement de grande ampleur (Tableau 6 et **Tableau 1**).

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**, positionné 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 Héléne.

Les mesures inclinométriques du système TELSITE actuel montrent, de septembre 2018 à décembre 2022, des évolutions globalement lentes au sein des différentes couches sous-jacentes de la zone Héléne (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 présentés ci-après pour les inclinomètres Lily J, I, H, G, F, D, B et A (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 périodicité annuelle bien marquées. Celles-ci suggèrent 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 correspondant à une vitesse moyenne d'inclinaison vers le sud de l'ordre de 0,08 mdeg/mois sur l'ensemble de la période d'enregistrement. La composante Est-Ouest est stable.

- Les deux composantes du **Lily I (Figure 24)** montrent des évolutions légèrement oscillantes et de faibles déformations cumulées. La plus importante est enregistrée par la composante Nord-Sud avec une inclinaison de l'ordre de -1,9 mdeg cumulés sur les 52 mois d'enregistrement, soit une vitesse moyenne d'environ 0,05 mdeg/mois vers le sud.
- A long terme, le **Lily H (Figure 24)** montre également de faibles taux de déformation. En revanche, des discontinuités ont été enregistrées : outre les mouvements de l'ordre de 1 mdeg vers le sud et de 0,3 mdeg vers le nord les 4 octobre et 4 décembre 2021 respectivement, une brève rotation vers le sud-ouest (composante Nord-Sud de -1,7 mdeg et composante Est-Ouest de -0,6 mdeg) est détectée le 21 octobre 2022.
- Depuis la mise en place du système, le **Lily G (Figure 24)** présente une lente rotation principalement vers le sud, avec une vitesse moyenne de 0,1 mdeg/mois environ. L'évolution à long terme de la composante Est-Ouest est extrêmement faible de l'ordre de -0,01 mdeg/mois. Alors que des irrégularités étaient enregistrées jusqu'au printemps 2020, l'évolution du Lily G est à présent globalement stable. Comme sur les mesures du Lily H, deux discontinuités sont également visibles les 4 octobre et 4 décembre 2021, ainsi qu'une le 21 octobre 2022 où une rotation vers le sud-ouest est mesurée. L'amplitude, très faible, de ces mouvements brefs n'excède pas 0,2 mdeg.
- Le **Lily F (Figure 25)** montre un mouvement lent à long terme de l'ordre de quelques centièmes de mdeg/mois, une inclinaison vers le nord est mesurée depuis la mise en place du système, ainsi qu'une composante vers l'ouest depuis le printemps 2020. Comme les deux inclinomètres précédents, le Lily F a enregistré des discontinuités les 4 octobre 2021, 4 décembre 2021 et 21 octobre 2022. Elles correspondent à de petites rotations brèves vers le nord-ouest. Chaque composante de la rotation du 21 octobre 2022 est de l'ordre de 0,03 mdeg.
- Depuis mi-2019, le **Lily D (Figure 25)** montre une rotation lente à long terme vers le sud-ouest, les vitesses de chacune des composantes n'excèdent pas 0,03 mdeg/mois. Seule une discontinuité avait été détectée le 4 décembre 2021.
- Une inclinaison à long terme du **Lily B (Figure 25)** est enregistrée depuis début 2019 vers le sud-sud-est. La rotation vers le sud a légèrement accéléré mi-2020, elle est depuis de l'ordre de 0,1 mdeg/mois. Celle vers l'est est très faible, de l'ordre de 0,02 mdeg/mois en moyenne sur toute la période de mesure. Malgré ses petites oscillations périodiques (d'amplitude de 0,1 mdeg environ), la courbe Nord-Sud laisse apparaître en 2022 de brèves et faibles rotations (de l'ordre de -0,2 à -0,3 mdeg), début avril et mi-juillet. Seule une légère discontinuité est visible mi-juillet sur la composante Est-Ouest.
- Les mesures du **Lily A (Figure 25)**, le plus profond, indiquent une lente inclinaison à long terme vers le sud-est (de l'ordre de 0,03 mdeg/mois vers l'est et de 0,01 mdeg/mois vers le sud) jusqu'au

22 août 2022, date à laquelle une brève rotation vers le nord (environ 0,25 mdeg) et vers l'est (environ 0,1 mdeg) est enregistrée.

Pour rappel, les données du Lily A ne peuvent pas être directement comparées aux mesures du système précédent. La chaîne inclinométrique de celui-ci était en effet implantée en zone Camélia et le capteur le plus profond disponible était situé à 451 m dans une unité conglomératique au-dessus du volcanisme.

Des pannes de matériel sont à l'origine des lacunes dans les enregistrements de certains inclinomètres (J, H, F, D et B) en mai 2020 et début 2021. Les équipements touchés ont été remplacés.

■ Synthèse des mesures inclinométriques

Similairement aux mouvements ponctuels enregistrés à deux reprises en 2021 (4 octobre et 4 décembre), un déplacement bref a été détecté le 21 octobre 2022 par les Lily H, G et F dans la partie profonde du massif corallien. En revanche, aucun signal équivalent n'est visible sur les courbes des Lily J et I les plus superficiels, ni sur celles des Lily D, B et A les plus profonds. Ces observations suggèrent un épisode de déformation de faible amplitude qui n'a pas affecté les couches superficielles (au moins jusqu'à 139 m de profondeur), ni les couches les plus profondes, des dolomies colorées jusqu'au socle volcanique (de 392 m à 613 m de profondeur). Comme en 2021, les rotations détectées sont brèves et faibles. Les composantes Est-Ouest et Nord-Sud les plus importantes sont obtenues pour le Lily H, respectivement -1,7 mdeg et -0,6 mdeg. A titre indicatif, l'inclinaison de 1 mdeg d'un segment rigide long de 50 m (i.e. la distance moyenne entre deux inclinomètres successifs) générerait un déplacement entre ses deux extrémités de l'ordre de 0,9 mm. Pour 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 du 21 octobre 2022 reflètent des déformations permanentes que les seuls enregistrements des trois inclinomètres touchés ne permettent pas d'interpréter en termes de mouvements des masses rocheuses.

En 2022, les Lily B et A au sein de la partie volcanique instrumentée de l'atoll ont également mesuré des mouvements ponctuels d'amplitudes très faibles (rotations n'excédant pas 0,3 mdeg) à des dates différentes, le Lily B début avril et début juillet, le Lily A le 22 août. Ces épisodes distincts et ponctuels détectés par inclinométrie résultent d'effets de faible amplitude et très locaux qui ne correspondent par ailleurs à aucun autre indicateur ou évènement concomitant.

Les ClinoF, dont la sensibilité est plus faible que celle des Lily, ne permettent pas d'identifier tous les petits mouvements brefs détectés par les Lily ; seules certaines discontinuités correspondantes, difficilement mesurables, se dégagent de leurs enregistrements. Celles visibles sur les Lily A et B, de très faible amplitude, ne sont pas détectées par les ClinoF correspondants.

Outre ces déformations ponctuelles, les Lily opérationnels implantés dans le puits vertical en zone Hélène montrent des évolutions faibles et globalement stables. 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 géomécanique en termes de déformation des masses rocheuses en profondeur ne peut être proposée.

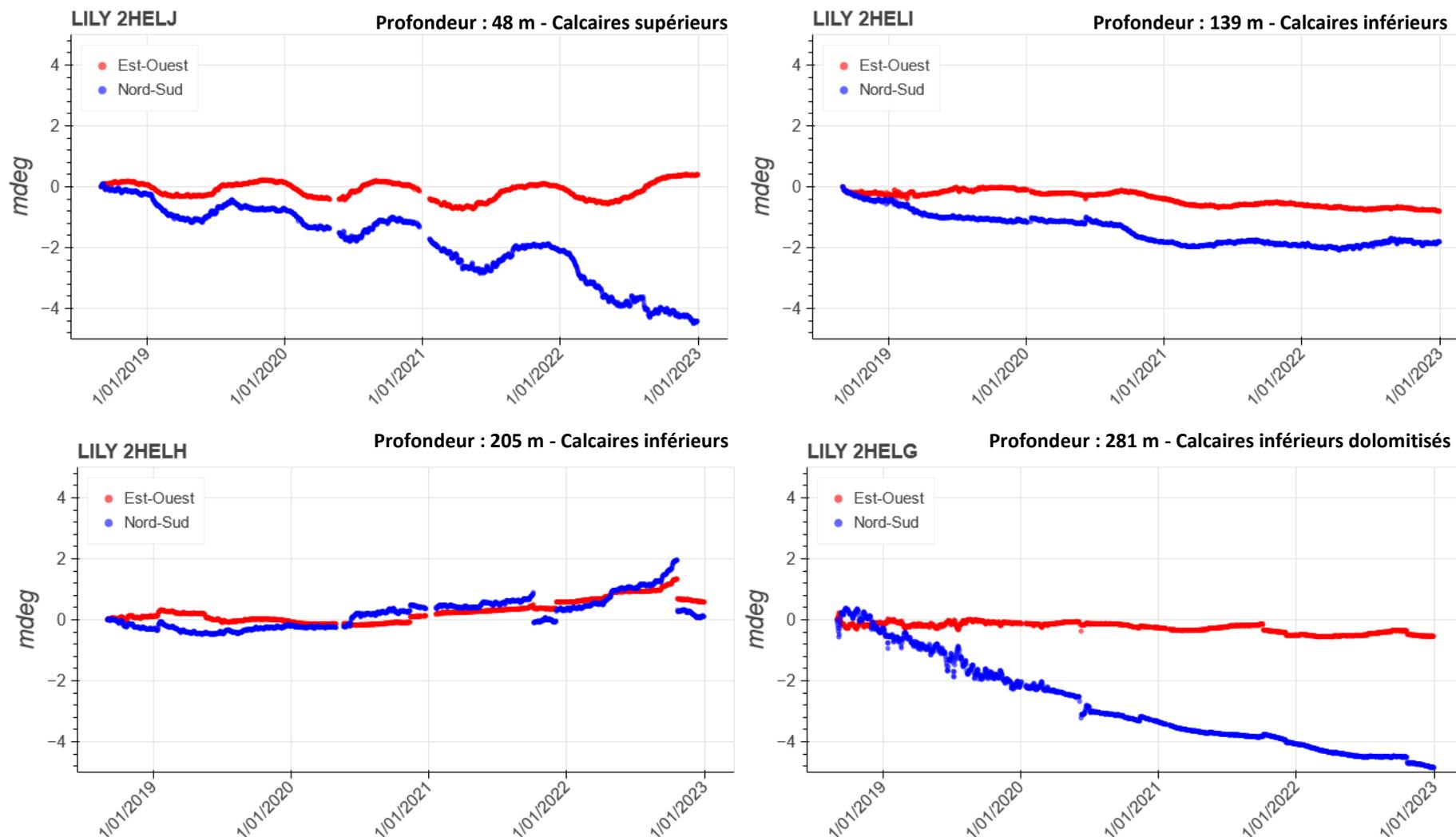


Figure 24 : Mesures de septembre 2018 à décembre 2022 des capteurs inclinométriques J, I, H et G de TELSITE, implantés en forage vertical en zone Hélène. L'échelle des ordonnées est choisie pour mettre en perspective ces évolutions par rapport à des variations de l'ordre de quelques mdeg/an au maximum correspondant à une situation normale.

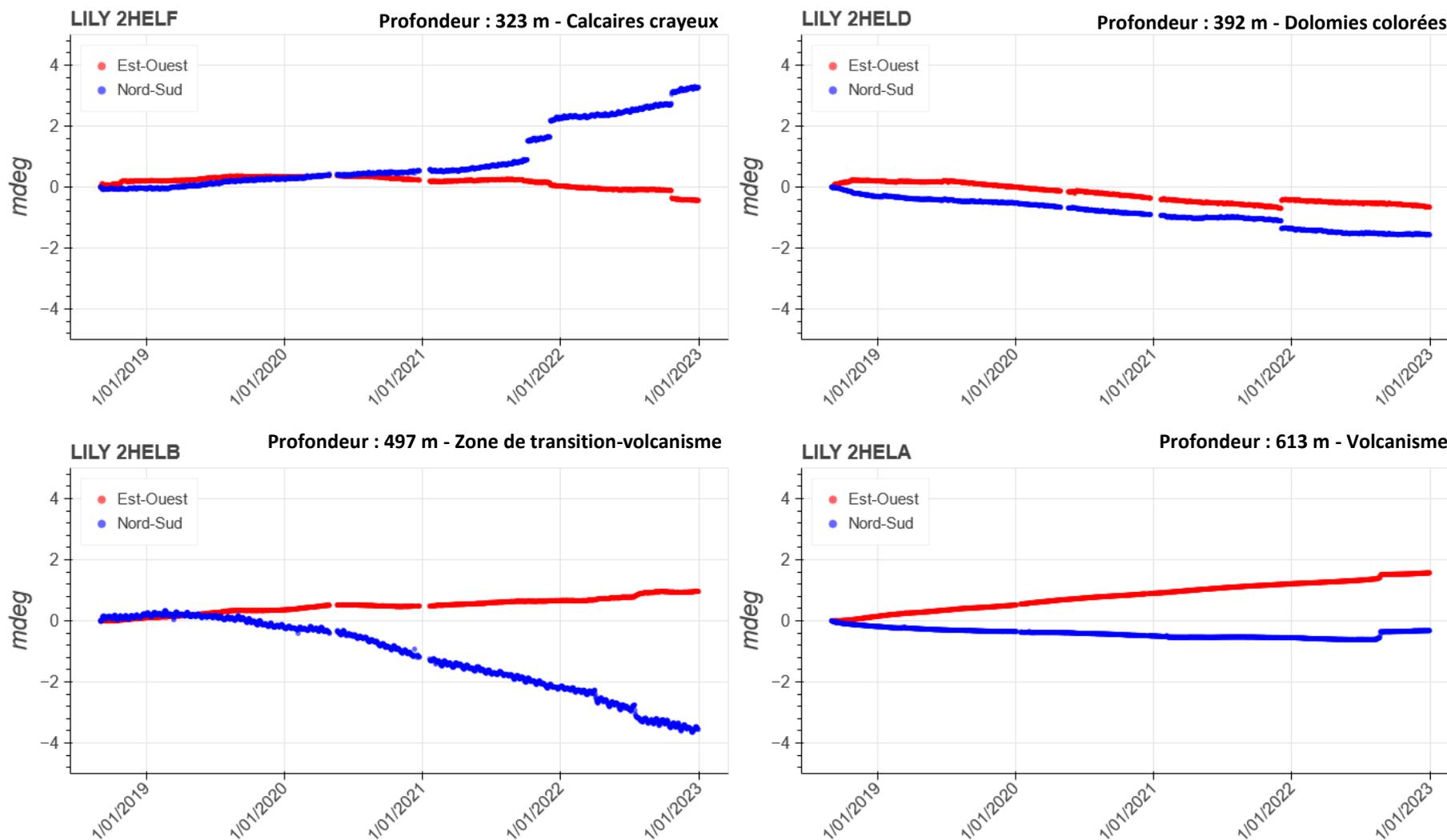


Figure 25 : Mesures de septembre 2018 à décembre 2022 des capteurs inclinométriques F, D, B et A de TELSITE, implantés en forage vertical en zone Hélène. L'échelle des ordonnées permet de mettre en perspective ces évolutions par rapport à des variations de l'ordre de quelques mdeg/an au maximum correspondant à une situation normale.

3.4. Analyse en termes de vitesses moyennes annuelles

Une synthèse des mesures relevées en 2022 en zone Nord-Est est présentée dans le Tableau 6.

En complément de l'étude détaillée au cours du temps présentée précédemment, une **analyse plus globale** de l'ensemble des mesures relevées (Tableau 6) en zone Nord-Est est réalisée **à l'échelle de l'année** : 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). Ces taux pour les mesures des déplacements et d'inclinométrie diffèrent par conséquent des vitesses indiquées dans les paragraphes précédents. **Ces vitesses moyennes 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 l'arrêt des expérimentations	Valeur en 2022	Valeur associée à un changement d'évolution significatif (passage au niveau 1**)
Sismicité : fréquence des microséismes	< 1 / semaine	0,73 / semaine	> 10 / semaine
Déplacements horizontaux*	< 2 mm / mois	0,13 mm / mois	> 20 mm / mois
Déplacements dans les forages inclinés	< 2 mm / mois	0,08 mm / mois	> 20 mm / mois
Déplacements verticaux*	< 1 mm / mois	0,08 mm / mois	> 10 mm / mois
Inclinométrie*	< 0,2 mdeg / mois	0,17 mdeg / mois	> 4,6 mdeg / mois

Tableau 6 : Synthèse et comparaison des mesures TELSITE obtenues en zone Nord-Est en 2022.
 *En valeur absolue. **Voir annexe 2

Ces comparaisons des mouvements sont illustrées sur les figures 26 à 28 en représentant pour chaque type de mesures la série temporelle pour laquelle la vitesse moyenne maximale en 2022 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 2022 aux vitesses de référence correspondantes, soit 2 et 20 mm/mois (Figure 26). La vitesse de ce FIL en 2022 résulte notamment du saut survenu en août. Elle est cependant très inférieure aux vitesses de référence.

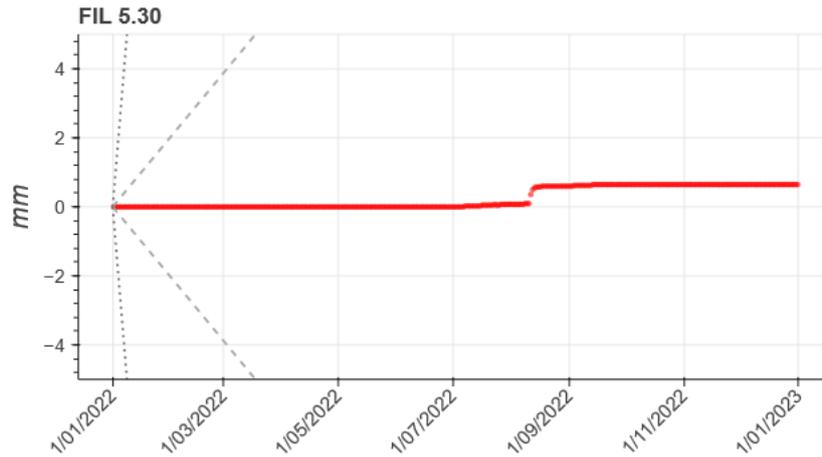


Figure 26 : Déplacements mesurés en 2022 par le câble du FIL à 30° en zone Irène comparés aux vitesses de référence (tiretés et pointillés gris) définies dans le Tableau 6 (2 et 20 mm/mois respectivement).

- **L'inclinomètre J**, situé à 48 m de profondeur, montre les variations les plus importantes en 2022. Une vitesse de 0,17 mdeg/mois est en effet obtenue pour sa composante Nord-Sud. Cette valeur est proche de celle observée au moment de l'arrêt des expérimentations en 1996, mais reste nettement inférieure à celle associée à un changement d'évolution significatif (Figure 27). Comme indiqué précédemment (§3.3.2), cet inclinomètre subit des variations saisonnières qui peuvent biaiser l'estimation des déformations permanentes lorsque celle-ci s'appuie sur des données d'une courte durée (un an ici). Pour rappel, sur toute la période de mesure, la vitesse de cette composante est de l'ordre de 0,08 mdeg/mois.

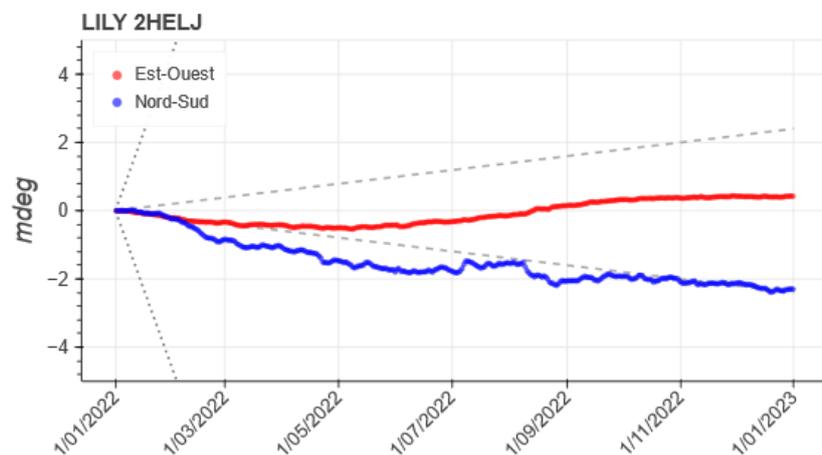


Figure 27 : Mesures en 2022 du capteur inclinométrique Lily J comparées aux vitesses de référence (tiretés et pointillés gris) définies dans le Tableau 6 (0,2 et 4,6 mdeg/mois respectivement). Les courbes ne démarrent pas au 1^{er} janvier en raison d'une coupure des données suite à une panne réparée 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. Afin de pallier les perturbations transitoires, tout en permettant de mettre en évidence d'éventuelles futures évolutions, les quatre dernières années d'enregistrement sont désormais prises en compte pour estimer les vitesses de déformation

permanente. Seules les lignes de base dont les mesures n'ont pas été interrompues sur la période 2019-2022 sont considérées.

- Les déplacements horizontaux et verticaux les plus rapides sont obtenus respectivement pour les lignes de base J055-L075 et J055-T077.
- Le déplacement horizontal (norme du vecteur défini par les composantes Est-Ouest et Nord-Sud) de J055-L075 est représenté avec les droites de pente 2 et 20 mm/mois, et la composante verticale de J055-T077 avec les droites de pente 1 et 10 mm/mois (Figure 28). Dans les deux cas, les tendances globales des courbes sont très inférieures à ces vitesses de référence définies dans le Tableau 6. Seules les variations saisonnières montrent des vitesses à court terme pouvant atteindre le même ordre de grandeur, mais ces déformations ne sont pas permanentes.

Pour les stations K107, E071, H049 et C075, les vitesses ne peuvent pas être estimées de manière fiable sur la période 2019-2022, en raison de coupures dans leurs enregistrements. Les mesures disponibles des trois premières stations (K107, E071, H049) montrent l'absence de déformations à long terme plus rapides que celles identifiées sur J055-L075 et J055-T077. Pour C075, qui a subi des pannes en 2022, les mouvements peuvent être évalués à partir des données de septembre 2018 à mars 2022. Les vitesses horizontales et verticales de J055-C075 estimées sur cette fenêtre, plus courte (près de 3,5 ans) et décalée dans le temps par rapport à la période 2019-2022, sont de l'ordre de 0,1 mm/mois. Il n'est donc pas exclu que la vitesse de J055-C075 soit actuellement légèrement supérieure à celle de J055-L075 en horizontal et à celle de J055-T077 en vertical. Les estimations disponibles suggèrent cependant qu'elles sont du même ordre de grandeur et qu'elles sont par conséquent toutes très inférieures aux vitesses de référence.

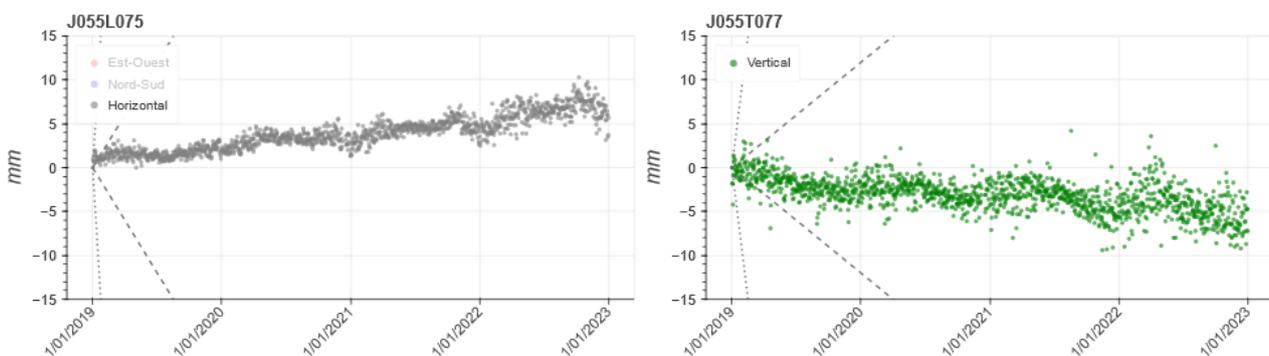


Figure 28 : A gauche, composante horizontale (norme) des déplacements de la station L075 et à droite, composante verticale de ceux de la station T077. Ces déplacements sont représentés de janvier 2019 à décembre 2022 (période utilisée pour le calcul des vitesses) par rapport à la station de référence J055. Les courbes sont 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. Ce niveau de risque s'appuie sur un indicateur global, appelé vitesse relative VR, dont l'évolution est représentée sur la **Figure 29**.

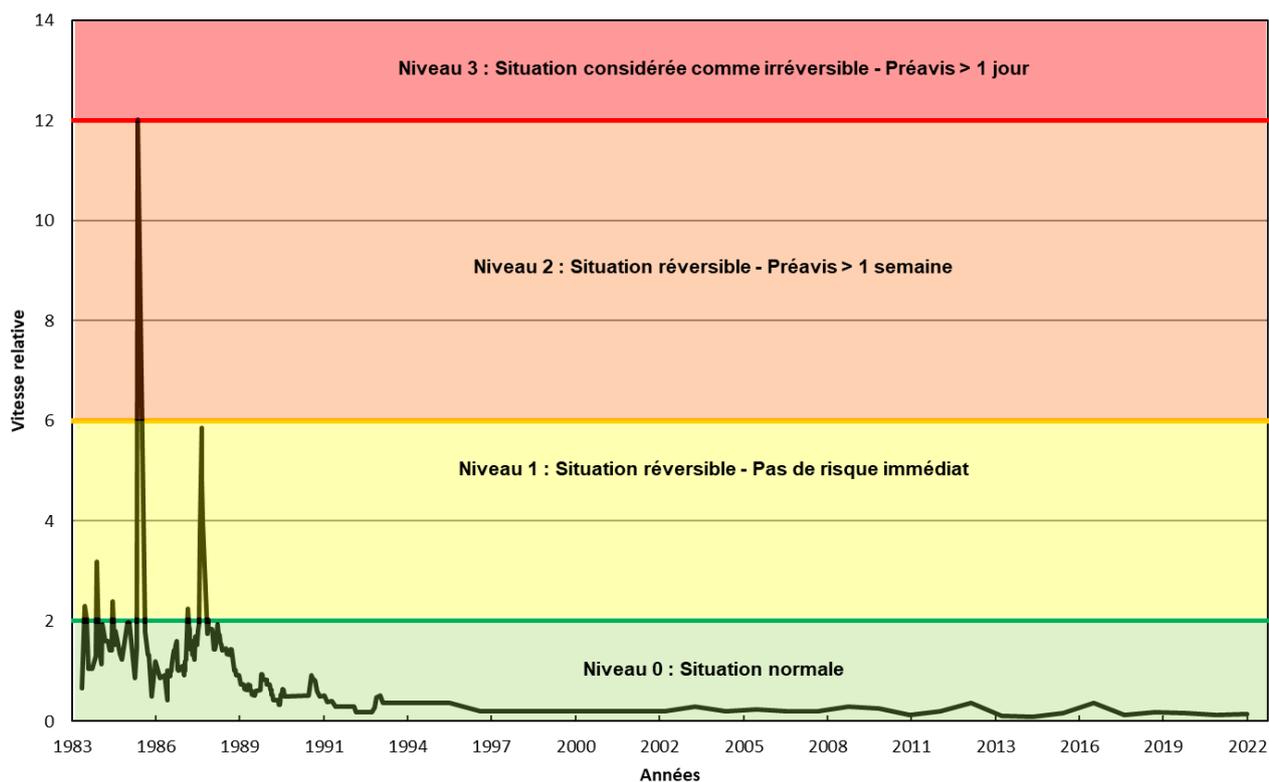


Figure 29 : Evolution au cours du temps de la vitesse relative VR (courbe noire), indicateur global de la situation géomécanique à Moruroa. Les niveaux de risque du tableau 1 et les délais de préavis vis-à-vis d'un évènement de grande ampleur sont reportés.

En 2022, 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.

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 une diminution de la qualité de traitement des petits évènements 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 une 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 (de magnitude $M_L \geq 1,0$). 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, lorsque le bruit sismique en surface est faible.

Après environ trois ans sans aucun relâchement de contraintes en zone Simone puis cinq évènements enregistrés en 2021, sept ont été détectés dans la partie interne de l'atoll en 2022 (Figure 30). Leurs magnitudes sont faibles, toutes inférieures ou égales à 0,4 (Figure 31).

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. Les enregistrements montrent par ailleurs la capacité de la station de surface à détecter les évènements significatifs ainsi que les plus petits lorsque le bruit de fond sismique est faible.

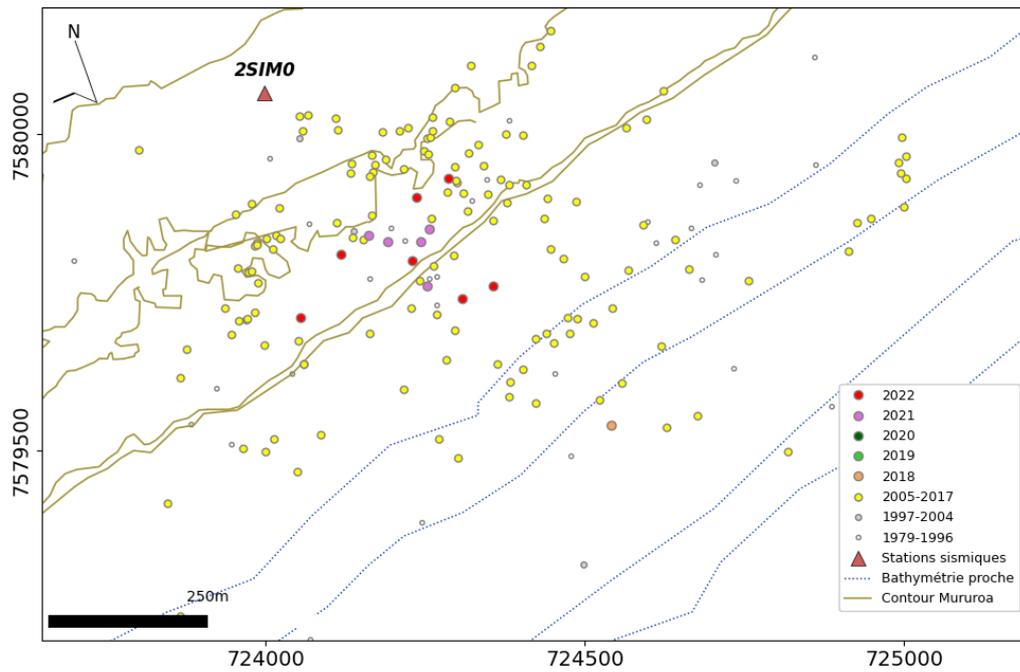


Figure 30 : Carte des événements microsismiques localisés de 1980 à 2022 en zone Sud-Est (données avant décembre 2005 non exhaustives). Le triangle rouge représente la station sismique de surface (2SIMO). Les contours bruns délimitent l'estran.

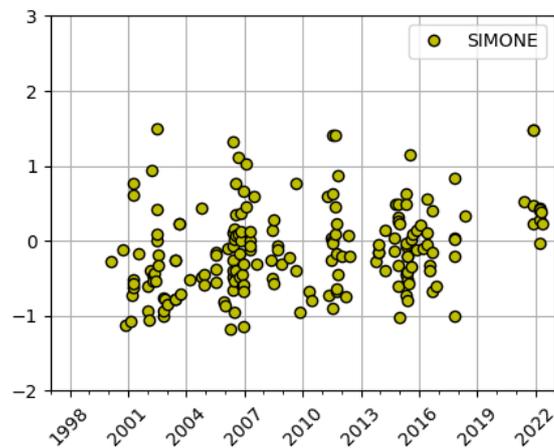


Figure 31 : Distribution temporelle des magnitudes M_L pour le secteur Sud-Est en zone Simone.

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 (COMSUP). 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 recueillies sont présentés ci-après. Les conclusions des campagnes antérieures (1996, 2001, 2007 et 2014) ont été rapportées dans des bilans antérieurs.

Les prestations sollicitées ont toutes été réalisées. Elles 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 (Figure 32) et verticaux (Figure 33) 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 (Figure 32). 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 très faibles, à présent d'environ 1,5 mm/an (Figure 32, en haut). Elles atteignaient 4 mm/an entre 2007 et 2014 (Figure 32, en bas).
- Sur son platier externe, les déplacements horizontaux ont progressivement ralenti atteignant au maximum 2-2,5 mm/an entre 2014 et 2021 (Figure 32, en haut). Les vitesses maximales étaient de 6-7 mm/an entre 2007 et 2014 (Figure 32, en bas).
- Après leur ralentissement global depuis 1996 (Figure 33), les mouvements de subsidence, c'est-à-dire d'affaissement, sont faibles. Leurs vitesses maximales, mesurées en zone Camélia, sont à présent de 2 mm/an sur la route en zone interne (Figure 33) et comprises entre 1 et 4 mm/an sur les digues en 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 PK6 S perdue, 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.

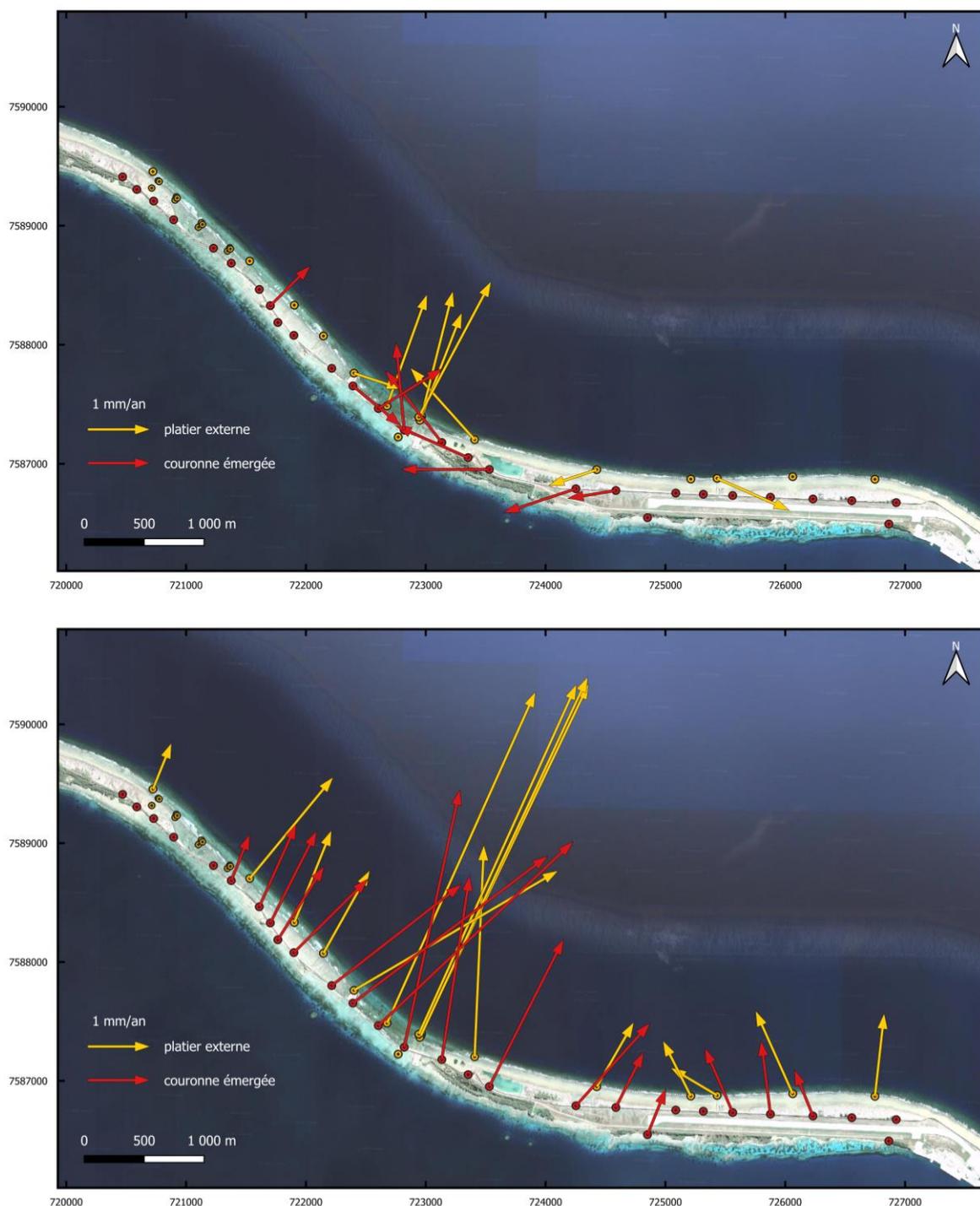


Figure 32 : Positions des piliers relevés par topographie (en rouge sur la couronne émergée et en jaune sur le platier externe) et vitesses de leurs déplacements, en haut, entre 2014 et 2021 et, en bas, entre 2007 et 2014. Seules les vitesses significatives (supérieures à 1 mm/an) sont représentées (fond de carte Google Maps).

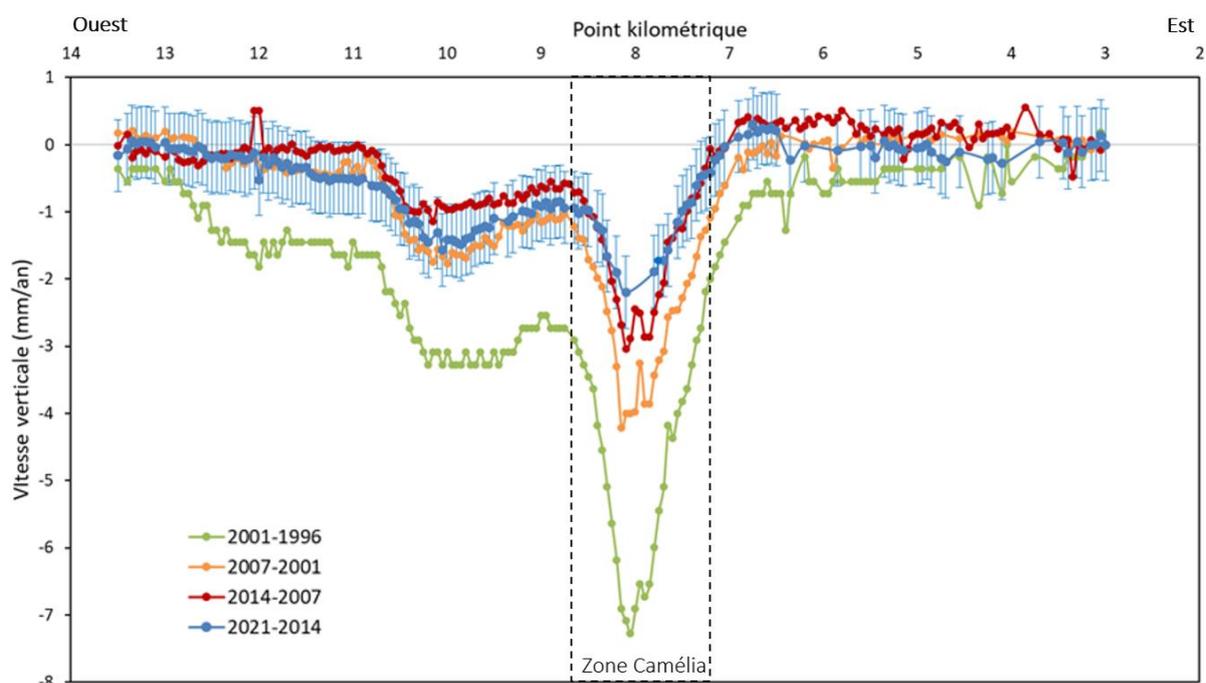


Figure 33 : Vitesses de déplacement vertical déduites des mesures de nivellement le long de la route Nord de Moruroa, en bleu entre 2014 et 2021, en rouge entre 2007 et 2014, en orange entre 2001 et en vert entre 1996 et 2001. Les barres d'erreur sont évaluées pour la période 2014-2021 à $\pm 0,5$ mm/an. Les tirets noirs délimitent la zone 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 Française, Camélia et Irène présentent des mouvements lents en profondeur.
- En zone Française, 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 intéressait, en zone externe, une partie immergée des masses carbonatées situées au-delà des fractures sous-marines. Il est à présent faible.

6. Fonctionnement du système TELSITE en 2022

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 : 98,1 %. La lacune est principalement due à l'interruption de la réception des données des capteurs en zone Viviane (du 22/06/22 au 09/09/22) et en zone Hélène (du 22/10/22 au 25/10/22). Ces dysfonctionnements ont nécessité des interventions sur site.
- pour les capteurs sismiques complémentaires : 99,7 %. Ce taux résulte d'une panne (du 22/03/22 au 29/03/22) de l'antenne qui permet l'horodatage. Cette antenne a été remplacée.
- pour les capteurs GPS : 94,8 %.

Ce taux reflète :

- des pertes partielles et intermittentes de réception de la station C075 entre avril et septembre, le radome et son câble ont été remplacés le 12/09/22,
 - un arrêt de la station H049 entre janvier et mars, le radome a été remplacé le 29/03/22,
 - des pertes partielles de réception de la station K107 entre janvier et mars, le radome a été remplacé le 30/03/22,
 - l'arrêt de la station K107 le 08/08/22 suite à la section d'un câble réparé le 08/09/22.
- pour les extensomètres : 99,8 %.
 - pour les inclinomètres en puits : 95,0 %.

En omettant les voies Est-Ouest du Lily C et Nord-Sud du Lily E pour lesquelles les signaux ne sont plus exploitables⁵, le taux de disponibilité est de 99,8 %.

- pour les marégraphes : 88,8 %.

Ce taux traduit principalement les coupures des données marégraphiques en Hélène entre le 18/05/22 et le 12/09/22 et depuis le 07/12/22 et en Viviane entre le 20/06/22 et le 09/09/22. Les capteurs en Anémone et en Irène ont également cessé de réceptionner leurs données le 17/12/22 et le 05/12/22 respectivement. Non essentiels à la surveillance et non nécessaires à l'alerte, les dépannages des marégraphes ne font pas l'objet d'intervention spécifique mais sont réalisés lors des missions de maintenance.

Au final, les objectifs d'alerte à 90 secondes et de surveillance géomécanique de long terme ont été assurés pendant 100 % de l'année 2022.

⁵ 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.

6.2. Faits marquants et actions de maintenance

En 2022, des actions de maintenance curative et préventive ont été menées au cours de deux missions dédiées du 28 mars au 6 avril et du 6 au 15 septembre.

Les principales actions de maintenance curative sont les suivantes :

- pour les capteurs GPS : remplacement des antennes des stations H049 (29 mars), C075 (29 mars et 12 septembre) et K107 (30 mars), des câbles coaxiaux de C075 (12 septembre) et de K107 (8 septembre),
- remplacement du capteur sismique de surface 3 ESP en Hélène (29 mars),
- remplacement du marégraphe en zone Hélène (6 septembre) arraché lors d'une tempête en mai 2022,
- pour les chaînes d'acquisition : remplacement de trois antennes GPS de datation, notamment celle de la station sismique en Camélia (29 mars), remplacement d'un numériseur en Viviane (9 septembre), remplacement d'une carte SD en zone Hélène (30 mars),
- pour les infrastructures : nettoyage de l'abri en Simone (inondation liée aux fortes houles) et de celui proche de la digue ECHO (présence de rats) en septembre, remise en état des équipements de la digue KILO pour le cheminement des câbles jusqu'au capteur K107 (7 et 8 septembre).

Les principales actions de maintenance préventive sont les suivantes :

- sauvegarde de l'ensemble des données instrumentales (8 septembre),
- contrôle des centrales solaires et des systèmes de distribution associés (du 28 mars au 6 avril),
- test des capteurs de secours des puits Hélène, Françoise et Irène (1^{er} et 2 avril),
- relevé des pressions dans les caissons des capteurs des puits Hélène, Françoise et Irène (1^{er} et 2 avril),
- sollicitations manuelles des extensomètres en Irène, Hélène et Françoise (1^{er} avril et 13 septembre),
- remplacement des résistances des cartes des dix coffrets des inclinomètres et des deux de secours pour l'analyse de l'influence de la température externe sur l'acquisition des signaux des Clino F notamment (13 septembre),
- remplacement préventif des marégraphes en service depuis plus de 24 mois, soit cinq capteurs, et contrôle des deux autres (entre le 30 mars et le 4 avril),
- remplacement préventif des antennes GPS de datation de toutes les stations équipées de numériseur, soit 17 antennes (31 mars),
- remplacement préventif des cartes d'alimentation des six coffrets d'interface des FIL, ainsi que des quatre coffrets de secours (13 septembre),
- remplacement préventif du coffret d'interface (oxydation) du marégraphe en zone Hélène (10 septembre),
- remplacement du cornet complet de la VSAT du PCT en raison de la présence d'eau (10 septembre),
- mise en conformité des coffrets de régulation et de leur liaison (du 28 mars au 6 avril),
- nettoyage et traitement préventif anti-rongeurs des abris (au cours des deux missions).

En dehors de ces missions, deux interventions de dépannage ont permis le remplacement :

- du coffret de régulation de la centrale solaire du PCT2 le 17 août,
- du numériseur du capteur sismique impliqué dans l'alerte en zone Hélène le 25 octobre. La panne de cet équipement avait entraîné la perte des données le 22 octobre.

6.3. *Bilan du fonctionnement de TELSITE pour l'année 2022*

Le dispositif automatique d'alerte, dit à 90 secondes, du système TELSITE a été opérationnel durant toute l'année 2022.

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

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

7. Conclusion générale

Le système de télésurveillance TELSITE de l'atoll de Moruroa a permis d'assurer un suivi continu sur toute l'année 2022. Les objectifs de la surveillance de l'atoll ont été remplis, tant en termes d'alerte à 90 secondes que du suivi de l'évolution géomécanique.

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).

En 1999, l'International Geomechanical Commission (IGC) avait recommandé le maintien d'une surveillance instrumentale continue uniquement à Moruroa. A Fangataufa, des campagnes d'observation périodique permettent le suivi de son évolution géomécanique. Les mesures issues des campagnes topographiques de 2001, 2007, 2014 et 2021 confirment la stabilisation des mouvements de cet atoll.

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 (vers le Sud ou le Nord) et compté à partir de l'extrémité 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 :

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

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 de 2 définit la situation pour laquelle les valeurs maximales observées dans l'année atteindraient 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 de 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.

Photo de couverture : © Amaury Vallage

