

MINISTÈRE DES ARMÉES

DIRECTION GÉNÉRALE
DE L'ARMEMENT

SERVICE DES ACTIVITÉS
NUCLÉAIRES ET DE DISSUASION

DÉPARTEMENT DE SUIVI
DES CENTRES D'EXPÉRIMENTATIONS NUCLÉAIRES

SURVEILLANCE DES ATOLLS DE MORUROA ET DE FANGATAUFA



TOME II
BILAN GÉOMÉCANIQUE
Année 2023

N°302 DGA/SAND/DSCEN du 04 juillet 2024
ENV 1CPSI RBE BIL 2400052 du 17 juin 2024

Synthèse

Ce document présente le bilan pour l'année 2023 de l'évolution géomécanique des atolls de Moruroa et de Fangataufa, anciens sites d'expérimentations nucléaires du Pacifique. Ces deux atolls font l'objet d'une surveillance géomécanique qui a été confiée au CEA/DAM par le ministère des Armées. À Moruroa, où les effets des expérimentations ont été les plus importants, un système automatique de télésurveillance, appelé TELSITE, permet de réaliser un suivi continu. Des campagnes périodiques d'observations topographiques permettent d'assurer la surveillance géomécanique de Fangataufa et de compléter celle de Moruroa.

Le système TELSITE déployé à Moruroa a pour objectif d'apprécier l'évolution des phénomènes de glissement sur les pentes de l'atoll et de veiller à la sécurité des personnes. De tels glissements pourraient générer des vagues dont la hauteur serait fonction du volume de roches déstabilisées. Deux types d'évènements, associés à deux catégories de scénarios, sont envisagés :

- Un « évènement de type 1 » correspond à un effondrement soudain et inopiné d'un pan de falaise corallienne de volume limité. Le risque de vagues est exclusivement local pour les personnes non protégées sur le platier de Moruroa. Un tel évènement est imprévisible, mais le système TELSITE, détectant les vibrations concomitantes, déclenche une alerte automatique, dite « à 90 secondes ». Les personnes exposées disposent au minimum de ce délai pour s'abriter avant le déferlement potentiel de la vague sur le platier.
- Un « évènement de type 2 » correspond à un glissement d'une masse corallienne importante. Susceptible de générer une vague de grande ampleur à Moruroa, cet évènement serait aussi observé à moindre échelle à Tureia et Vanavana et constitue un risque potentiel pour les personnes présentes sur ces atolls. Une telle déstabilisation est précédée, à minima plusieurs semaines avant, de signes avant-coureurs enregistrés par le système TELSITE. Lorsque de telles prémices sont diagnostiquées, les mesures de protection peuvent être prises bien avant l'occurrence de l'évènement.

Afin de répondre aux exigences de la surveillance, le dispositif instrumental du système TELSITE, décrit en détail dans le document, est composé :

- de stations sismiques en surface et au fond de trois forages pour analyser l'activité microsismique,
- de capteurs GPS pour mesurer les déplacements en surface,
- d'inclinomètres répartis le long d'un forage vertical et d'extensomètres implantés dans six forages inclinés pour détecter les mouvements en profondeur.

Le bilan pour l'année 2023 de l'évolution géomécanique de la zone Nord-Est de Moruroa est établi à partir des mesures acquises par ces capteurs. Dans la continuité des années précédentes, l'activité microsismique de la zone Nord-Est de Moruroa reste très faible, tant en nombre d'évènements qu'en magnitude (54 évènements de magnitude inférieure à 1,7). Aucune alerte « à 90 secondes » n'a été déclenchée en 2023. La répartition de la microsismicité au sein de la zone Nord-Est ne traduit pas d'évolution de la géométrie des différents secteurs où elle se manifeste depuis la fin des expérimentations nucléaires. En surface, les déplacements restent lents en zone Nord-Est (de l'ordre de 1 mm/mois au maximum). Dans les zones Camélia et Hélène, comme les années précédentes, les composantes horizontales montrent des mouvements vers l'océan et les composantes verticales des affaissements. Dans leur ensemble, les déformations mesurées en profondeur sont minimales en zone Nord-Est ; les déplacements moyens mesurés par extensométrie sont inférieurs à 0,2 mm/mois et les mouvements des capteurs inclinométriques sont de l'ordre de 0,1 mdeg/mois au maximum. Les résultats de 2023, dans la continuité de ceux des années passées, indiquent des mouvements minimes en zone Nord-Est, en accord avec les données de la campagne topographique de 2021, rappelées dans le document.

Chaque année, l'ensemble des données du système TELSITE est synthétisé sous forme d'un indicateur permettant de caractériser la situation géomécanique de la zone Nord-Est et d'évaluer le risque d'un évènement de grande ampleur (type 2). En 2023, cet indicateur témoigne d'une situation normale, au niveau le plus faible de l'échelle des risques.

Dans la zone Sud-Est de Moruroa, les données microsismiques, seuls enregistrements disponibles, montrent en 2023 une activité très faible, dans la continuité de celle précédemment détectée.

À Fangataufa, les mesures issues des campagnes topographiques périodiques confirment la stabilisation des mouvements de l'atoll.

Sommaire

1. Résumé	3
2. La surveillance géomécanique de l'atoll de Moruroa	4
2.1. Suivi continu de l'évolution de Moruroa	4
2.2. Composantes du système de télésurveillance TELSITE	7
2.3. Campagnes complémentaires de caractérisation de l'évolution des atolls	11
3. Bilan de l'évolution de la zone Nord-Est de Moruroa en 2023	12
3.1. Analyse des mesures instrumentales	12
3.2. Sismicité.....	13
3.3. Déplacements mesurés en surface à partir des données GPS	25
3.4. Mouvements mesurés en profondeur par extensométrie	36
3.5. Mouvements mesurés en profondeur par inclinométrie	43
3.6. Analyse globale : comparaison aux vitesses de référence et indicateur VR.....	52
4. Bilan de l'évolution dans le secteur Sud-Est de Moruroa (zone Simone).....	56
5. Campagne topographique 2021 : principaux résultats.....	57
5.1. Principaux résultats pour Moruroa.....	57
5.2. Principaux résultats pour Fangataufa	59
5.3. Interprétation pour la zone Nord-Est de Moruroa	59
6. Fonctionnement du système TELSITE en 2023	60
6.1. Disponibilités des mesures	60
6.2. Faits marquants et actions de maintenance.....	61
6.3. Bilan du fonctionnement de TELSITE pour l'année 2023	62
7. Conclusion générale pour l'année 2023	63
8. Glossaire.....	64
9. Annexes	65
9.1. Annexe 1 : Analyse de la sismicité en termes d'énergie	65
9.2. Annexe 2 : Suivi temporel de la situation géomécanique et du niveau de risque de la zone Nord-Est de Moruroa	66

1. Résumé

Dans le cadre de la surveillance des anciens sites d'expérimentations nucléaires du Pacifique, le suivi de l'évolution géomécanique des atolls de Moruroa et Fangataufa a été confié au CEA/DAM par le ministère des Armées. À Moruroa, où les effets des expérimentations ont été les plus importants, il repose sur le système automatique de télésurveillance TELSITE (TELésurveillance de SITE). Ce dispositif a été entièrement rénové entre 2016 et 2018. À Fangataufa, la surveillance repose sur des observations topographiques effectuées lors de campagnes périodiques. Celles-ci sont également menées à Moruroa.

Ce rapport décrit le système TELSITE opérationnel depuis août 2018, et présente le bilan de l'évolution géomécanique et du fonctionnement du système de surveillance pour l'année 2023.

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 2023. 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 dans des forages pour détecter les mouvements en profondeur. Pour la zone Sud-Est de Moruroa, seule la microsismicité est examinée. 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 2023, l'activité microsismique de la zone Nord-Est de Moruroa reste très faible, tant en nombre d'évènements qu'en magnitude, dans la continuité des années précédentes. La répartition de cette microsismicité au sein de la zone Nord-Est ne traduit pas d'évolution de la géométrie des différents secteurs où elle se manifeste depuis la fin des expérimentations nucléaires. En surface, les déplacements verticaux et horizontaux restent faibles en zone Nord-Est. Dans les secteurs Camélia et Hélène, des déplacements horizontaux vers l'océan et des subsidences, c'est-à-dire des affaissements, tous de faible vitesse, sont observés comme les années précédentes. En profondeur, les mesures d'extensométrie et d'inclinométrie 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 2023, dans la continuité de celle précédemment détectée.

Après le ralentissement global observé depuis la fin des expérimentations en 1996, le mouvement mesurable à Moruroa est à présent très lent. Les vitesses mesurées ne montrent pas de changement de tendance en 2023 par rapport aux bilans géomécaniques précédents, ce qui suggère qu'elles sont en train de se stabiliser. L'évolution de l'atoll peut être classée au niveau le plus faible de l'échelle des risques (Tableau 2), 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

Des personnes étant présentes en permanence à Moruroa, la première mission de TELSITE est de couvrir, à Moruroa uniquement, le risque d'effondrement inopiné d'un pan de falaise corallienne de volume limité, appelé « évènement de type 1 » (Tableau 1), susceptible de générer une vague qui déferlerait localement et rapidement sur cet atoll. Un tel effondrement s'accompagnerait de vibrations qui seraient perçues par les capteurs sismiques installés sur le pourtour de l'atoll. Le retour d'expérience de l'éboulement qui a suivi l'expérience Tydée en juillet 1979 montre qu'entre le moment où ces ondes seraient enregistrées et celui où

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

une vague pourrait déferler sur le platier, il s'écoulerait au moins 90 secondes³. Un mur côté océan s'étend sur environ 13 km entre les PK7 N et PK6 S, protégeant de telles vagues une large zone à l'Est de l'atoll, appelée zone vie. Les personnes présentes hors de cette zone disposeraient de ce délai minimum de 90 secondes pour rejoindre les refuges en hauteur répartis sur l'atoll (Figure 1). Dans une telle éventualité, le système TELSITE est conçu pour envoyer automatiquement (sans intervention humaine) une alerte, dite « à 90 secondes », en direction des personnes présentes à Moruroa et parallèlement vers l'astreinte du CEA/DAM en métropole. Le personnel à Moruroa 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. Un test mensuel de l'alerte « à 90 secondes » permet de s'assurer du fonctionnement de la chaîne d'alerte.



Figure 1 : Exemple de refuge en hauteur le long de la route Nord à Moruroa.

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. Ce suivi géomécanique a pour objectif de détecter les prémices d'un éventuel glissement d'une masse importante de la couverture corallienne en zone Nord-Est à Moruroa, nommé « événement de type 2 » (Tableau 1). Une telle déstabilisation de grande ampleur serait en effet précédée, plusieurs semaines à plusieurs mois à l'avance, de signes avant-coureurs qui seraient repérés grâce aux différents capteurs. Si un diagnostic révèle une évolution anormale, des observations et analyses complémentaires seront réalisées. Ainsi, les mesures de protection des personnes, en particulier l'évacuation préventive de l'atoll de Moruroa, pourraient être prises dès les prémices de ce glissement hypothétique, bien avant son occurrence.

S'appuyant sur les observations géologiques, notamment les fractures présentes sur le platier, des simulations numériques réalisées au CEA/DAM conduisent à une hypothèse de glissement la plus pénalisante impliquant un volume n'excédant pas 700 millions de m³ de roches en zone Camélia et générant une vague pouvant atteindre 20 m de haut au maximum à proximité de l'évènement. La zone protégée par les murs serait partiellement submergée dans sa partie Nord-Ouest. À plus longue distance, la vague se propagerait vers le Nord-Est, vers l'atoll de Tureia, situé à une centaine de kilomètres. Les calculs permettent de considérer qu'en cas d'arrivée du train de vagues sur cet atoll, leurs hauteurs seraient comprises entre 1 et 3 m au niveau de son littoral Nord et pourraient submerger la couronne corallienne au niveau de son littoral Sud.

³ Cette valeur a été mesurée lors de l'évènement qui a suivi l'expérience Tydée en 1979 et confirmée par des simulations réalisées par le CEA/DAM.

L'ensemble des dispositions graduelles de sécurité a été consigné dans le Plan communal de sauvegarde (PCS) de la commune de Tureia en novembre 2012⁴.

	<u>Evènement de type 1</u> Effondrement inopiné d'un pan limité de falaise corallienne	<u>Evènement de type 2</u> Glissement d'une masse importante de la couverture corallienne
Volume de roches arrachées	≤ 70 millions de m ³	≤ 700 millions de m ³
Risque potentiel	Risque exclusivement pour la zone de Moruroa non protégée et proche de l'évènement	Risque local et propagation potentielle vers les atolls voisins de Tureia et de Vanavana
Vagues potentielles	Vagues de 2 à 4 m maximum à proximité de l'évènement	Vagues de 20 m maximum à proximité de l'évènement Vagues de 3 m maximum à Tureia et submersion temporaire de Vanavana
Préavis	Evènement inopiné Délai de 90 secondes entre la détection des vibrations générées par l'effondrement et le déferlement sur le platier	Préavis de plusieurs semaines (signes avant-coureurs détectés avant l'occurrence du glissement)

Tableau 1 : Caractéristiques des deux types d'évènements qui font l'objet du suivi géomécanique par le système de surveillance TELSITE à Moruroa.

Afin d'évaluer l'évolution géomécanique de l'atoll, les données instrumentales sont examinées à différentes échelles de temps. Outre l'étude détaillée de ces données, une analyse globale, s'appuyant sur les vitesses d'évolution moyennes annuelles calculées pour 2023, permet de synthétiser l'ensemble des mesures acquises au cours de l'année sous la forme d'un unique indicateur appelé vitesse relative (VR). Cette quantité, sans dimension, permet notamment de comparer la situation actuelle à celle observée juste après l'arrêt définitif des expérimentations. Cet indicateur global, présenté plus en détail en annexe 2, permet d'évaluer le niveau de risque vis-à-vis d'un évènement de grande ampleur et le délai de préavis associé (Tableau 2).

⁴ 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 2 : Niveaux de risque vis-à-vis d'un événement de type 2, c'est-à-dire 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 2, 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 extensomètres permettant le suivi des déplacements de câbles en forages inclinés latéraux (FIL) pour la mesure des déformations des flancs de l'atoll ;
- des inclinomètres bi-composantes, positionnés à différentes profondeurs le long d'un forage 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 3 sont rappelés les composants du système TELSITE : les types de capteurs, les mesures qu'ils permettent d'effectuer et leurs nombres. Le Tableau 4 résume les caractéristiques (nomenclature, inclinaison et localisation) des six FIL accueillant les extensomètres.

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 ».

La répartition géographique de l'instrumentation au sein de la zone Nord-Est de l'atoll est indiquée sur les Figures 3 et 4.

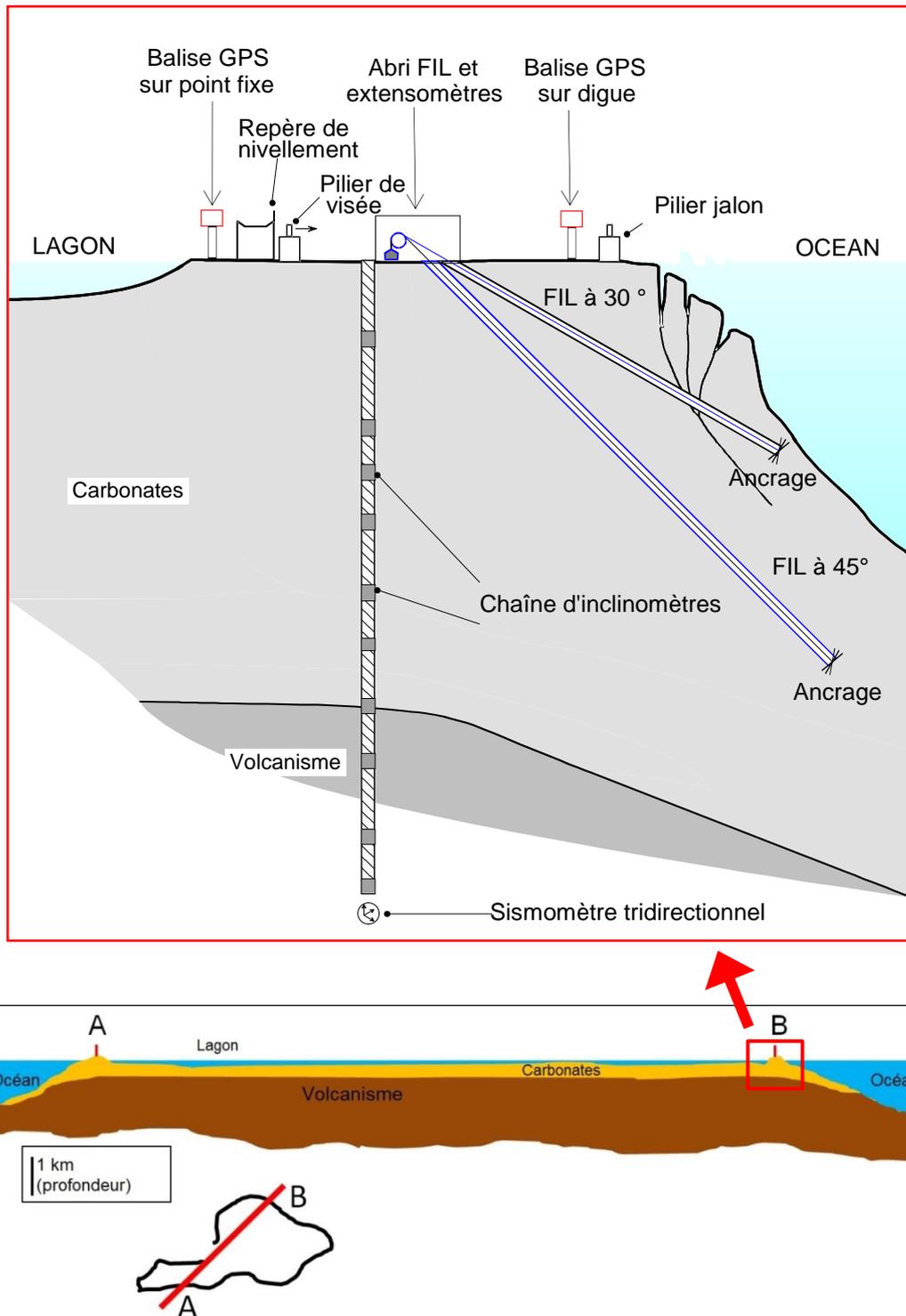


Figure 2 : Schéma de principe (en haut) de l'instrumentation du système de surveillance continue TELSITE. Cette coupe schématique représente les principaux types de mesures réalisées en zone Nord-Est à Moruroa (localisation sur la coupe du bas). Les déplacements en surface sont mesurés par les stations 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° en zones Irène, Hélène et Françoise
Inclinomètres	Mesure des déformations en profondeur	Une chaîne de capteurs implantés dans un forage en zone Hélène
Marégraphes	Mesure de la hauteur des vagues	Sept capteurs répartis sur l'atoll

Tableau 3 : Capteurs et mesures du système TELSITE.

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

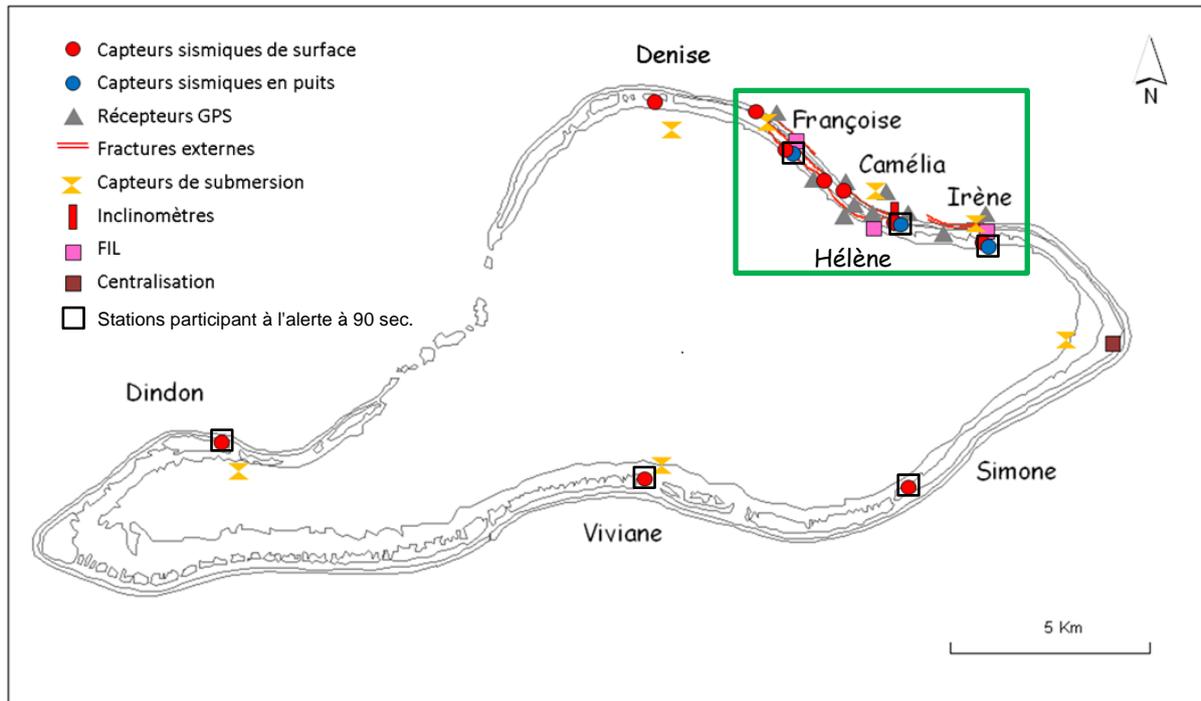


Figure 3 : Implantation de l'instrumentation du système TELSITE. L'encadré en vert est repris en détail dans la Figure 4 ci-dessous. Les capteurs de submersion sont appelés marégraphes dans le texte.

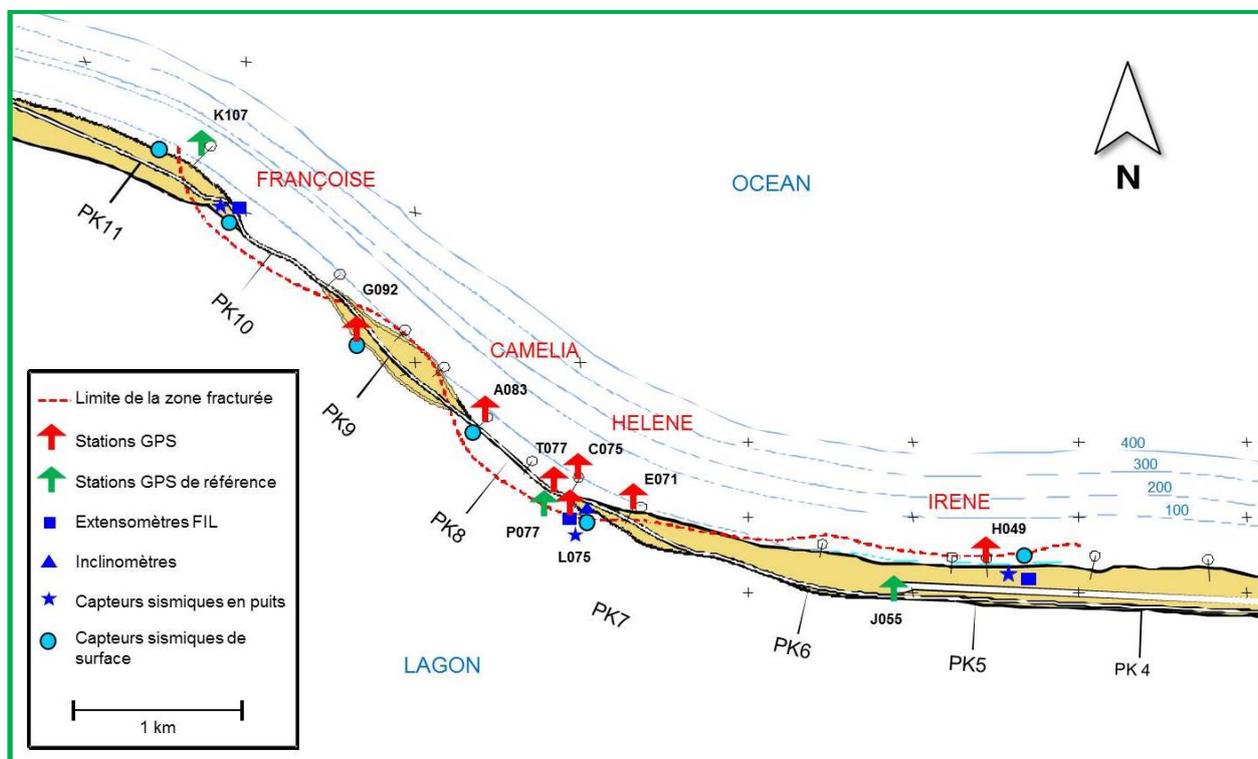


Figure 4 : Détail en zone Nord-Est de l'implantation de l'instrumentation du système TELSITE.

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 (guide géomécanique, 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 ; la prochaine sera planifiée entre 2028 et 2031.

Les principaux résultats issus des mesures de 2021 sont reportés de façon synthétique dans ce document (§5).

3. Bilan de l'évolution de la zone Nord-Est de Moruroa en 2023

3.1. Analyse des mesures instrumentales

L'analyse de l'évolution géomécanique de la zone Nord-Est s'appuie sur :

- la **sismicité** (§3.2) enregistrée par les stations sismiques,
- les **déplacements en surface** (§3.3) mesurés par les capteurs GPS,
- les **mouvements en profondeur** (§3.4 et §3.5) détectés par les extensomètres et les inclinomètres implantés dans des forages.

Le bilan géomécanique pour 2023 est établi en examinant les mesures enregistrées au cours de l'année, tout en les analysant au regard de celles acquises précédemment afin de suivre leurs évolutions à différentes échelles de temps :

- Les stations sismiques enregistrent les vibrations du sol. L'analyse de ces données permet d'identifier et de caractériser les microséismes⁵ au sein de l'atoll. Les évènements survenus en 2023, ainsi identifiés, sont examinés et viennent compléter la base de données de la sismicité instrumentale de l'atoll. Cette base permet de suivre l'évolution temporelle de la sismicité en termes de nombre d'évènements, de localisation et d'énergie libérée depuis 1997, après les dernières expérimentations nucléaires (§3.2).
- Les données des capteurs GPS, des extensomètres et des inclinomètres fournissent des mesures directes de la déformation en surface ou en profondeur. Elles sont examinées à différentes échelles de temps (§3.3, §3.4 et §3.5) :
 - Les mesures récentes sont tout d'abord mises en regard de celles acquises par le dispositif de surveillance précédent lorsque des capteurs « équivalents » existent. Il est important de noter que ces capteurs dits « équivalents » présentent des différences en termes de technologie et d'emplacement. Leurs données et celles acquises actuellement ne sont donc pas strictement comparables ; elles ne peuvent pas être interprétées comme constituant un même ensemble homogène et cohérent de mesures. Cependant, elles peuvent être juxtaposées sur un même graphique afin de réaliser une comparaison au premier ordre et obtenir une image globale de l'évolution des mouvements sur une plus grande période de temps.
 - Les mesures acquises par le dispositif de surveillance actuel depuis le 1^{er} janvier 2019 permettent d'examiner les mouvements récents, plus particulièrement ceux de 2023 et leurs vitesses moyennes.
- Dans un dernier temps (§3.6), les mesures acquises en 2023 font l'objet d'une analyse globale qui permet notamment de synthétiser l'ensemble des mesures sous la forme d'un unique indicateur VR (vitesse relative) présenté précédemment (§2.1.2) et décrit en annexe 2.

⁵ On appelle microséismes les séismes de magnitude inférieure à 1.

3.2. Sismicité

Les événements microsismiques détectés de manière automatique sont analysés en différé par les experts du CEA/DAM qui identifient et localisent les microséismes locaux. Les événements les plus couramment observés sont de type « relâchement de contraintes », terme désignant un séisme de très faible magnitude ou 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, comme des éboulements de volume limité ou des petits glissements de terrain qui peuvent donner lieu à des signaux sismiques de plus longue durée et de formes plus complexes.

La répartition géographique des événements enregistrés en 2023 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'événements, puis de magnitude et d'énergie libérée.

3.2.1. Répartition spatiale de la sismicité

■ Répartition par secteurs géographiques

La répartition géographique des événements sismiques⁶ est représentée sur la Figure 5. Afin d'analyser la sismicité plus aisément, la zone Nord-Est de Moruroa est découpée en quatre secteurs (Figure 5) définis en cohérence avec la localisation de l'instrumentation du système de surveillance TELSITE (l'activité sismique étant de très faible amplitude, le niveau de détectabilité est en effet sensible à la position des capteurs ; ceux situés en profondeur présentent l'implantation la plus favorable car ils sont moins perturbés par le bruit microsismique généré en surface par le déferlement des vagues et la houle océanique). Ce découpage comprend :

- le secteur Françoise auquel est associée la station sismique 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 Camélia⁷.

En 2023, 54 microséismes ont été détectés en zone Nord-Est par le système TELSITE (Figure 5, points rouges) : 20 en Françoise, 8 en Gisèle-Camélia, 10 en Camélia-Hélène et 16 en Irène. Aucun n'a déclenché d'alerte.

⁶ Certaines localisations ont été ajustées suite à de nouvelles analyses menées à différentes périodes : en 2005 et 2008 pour des événements de 2000, 2003 et 2004, et en 2016 pour certains événements 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'événements 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.

⁷ Dans l'hypothèse d'un glissement dans le secteur Françoise, le volume maximum de roches serait deux fois plus faible que celui de l'hypothèse la plus pénalisante.

Dans les §3.2.2 et §3.2.3, la microsismicité est également examinée en termes d'évolution temporelle et d'amplitude pour chacun de ces quatre secteurs.

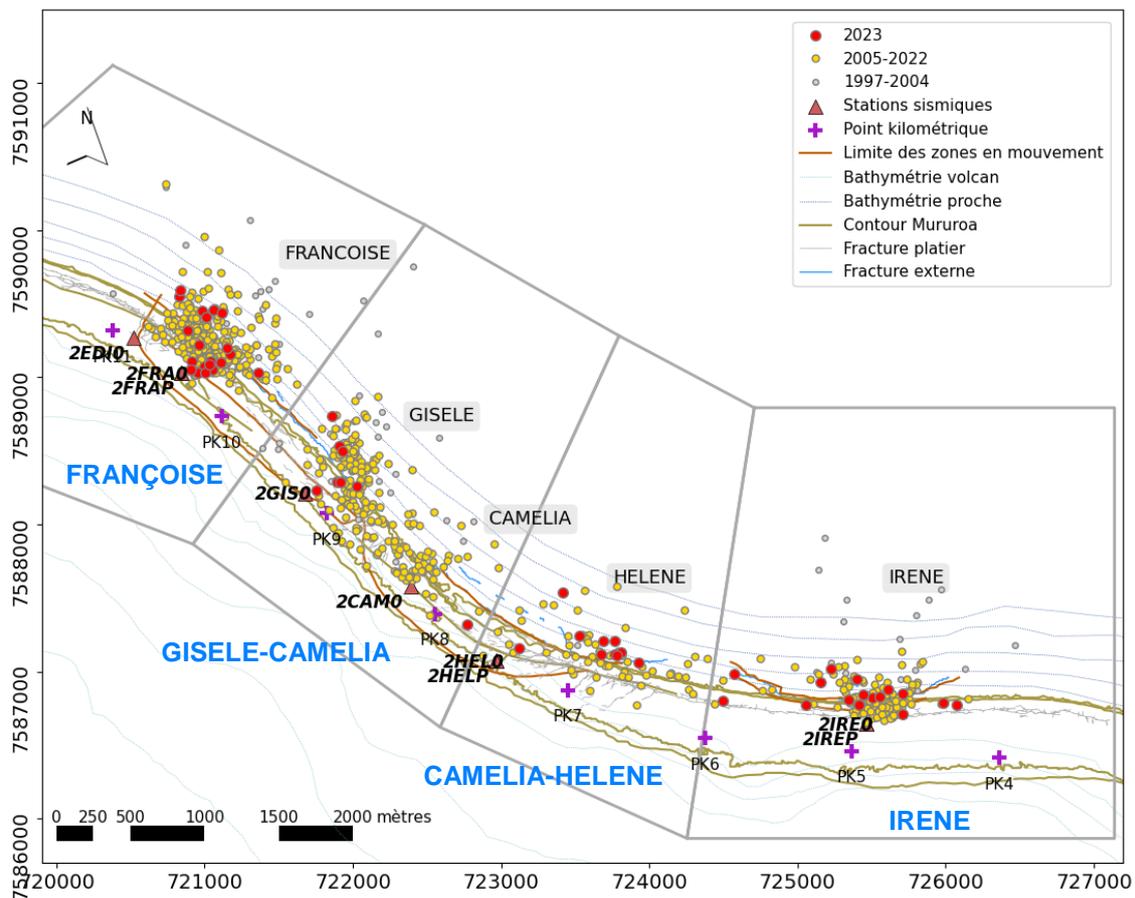


Figure 5 : Historique de la répartition spatiale de la microsismicité en zone Nord-Est de 1997 à 2023 (cercles colorés par période). Les stations sismiques de TELSITE utilisées dans le processus de localisation sont représentées par des triangles. Les quatre secteurs (polygones gris) définis pour l'analyse 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.

■ **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 évènements situés à moins de 750 m du plan de coupe, fournit une représentation de la sismicité en profondeur (Figure 6 à Figure 9). 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 de coupe des évènements trop éloignés induirait des erreurs d'interprétation et ne semble par conséquent pas pertinent.

La répartition en profondeur de la sismicité mesurée au cours de l'année 2023 (Figure 6 à Figure 9) confirme une nouvelle fois que l'ensemble des évènements reste confiné à l'intérieur ou le long des limites supposées des trois masses superficielles carbonatées identifiées comme étant en mouvement dans les zones Française

(PK10 N), Camélia (PK8 N) et Irène (PK5 N). La quasi-totalité des événements détectés en 2023 ont en effet des profondeurs inférieures à 400 mètres. Par ailleurs, comme détaillé dans le §3.2.3, ils sont de très faible magnitude.

Sur la coupe du secteur François (Figure 6), 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 5) comme en coupe (Figure 8), le secteur Camélia-Hélène présente la microsismicité la plus faible sur la totalité de la période de mesure.

En 2023, 54 microséismes ont été détectés par le système TELSITE en zone Nord-Est, cependant aucun n'a été suffisamment important pour déclencher une alerte « à 90 secondes ». Les mesures sismiques enregistrées 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.

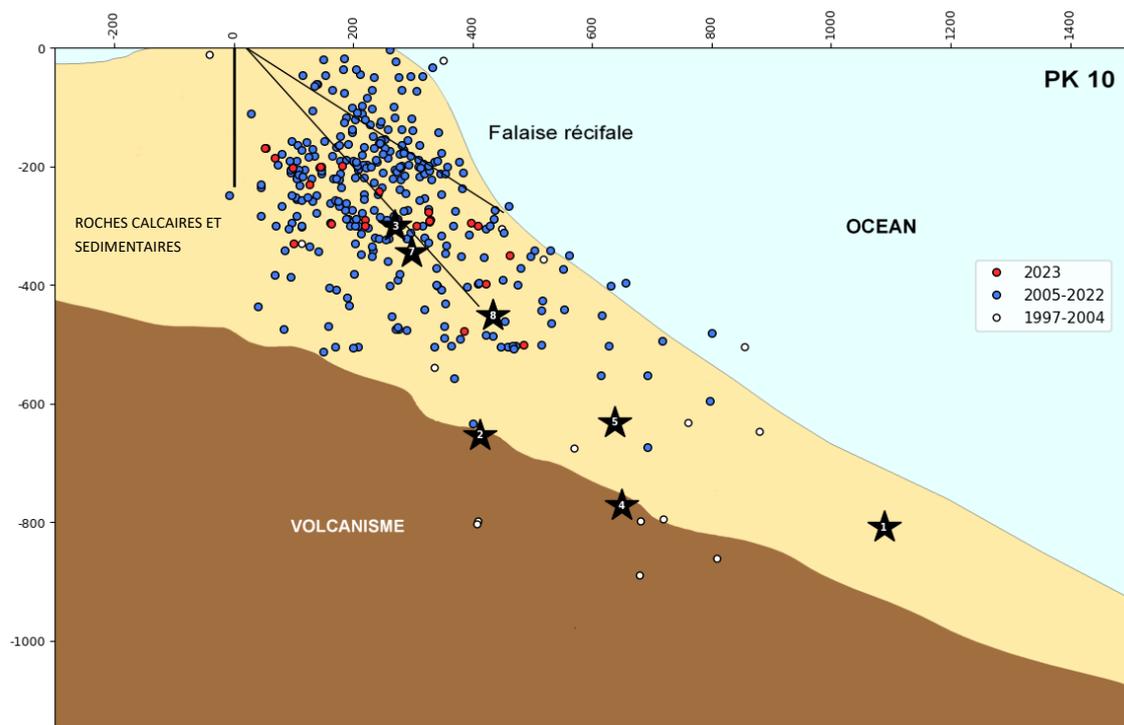


Figure 6 : Projection sur une coupe géologique traversant le secteur François des événements sismiques enregistrés de 1997 à décembre 2023 (cercles colorés par période). Les étoiles noires indiquent les événements ayant déclenché des alertes (1 : 01/04/2003, 2 : 27/11/2006, 3 : 29/11/2006, 4 : 02/10/2006, 5 : 12/01/2007, 7 : 15/09/2009, 8 : 19/09/2009). Les traits noirs indiquent les forages de l'instrumentation de TELSITE.

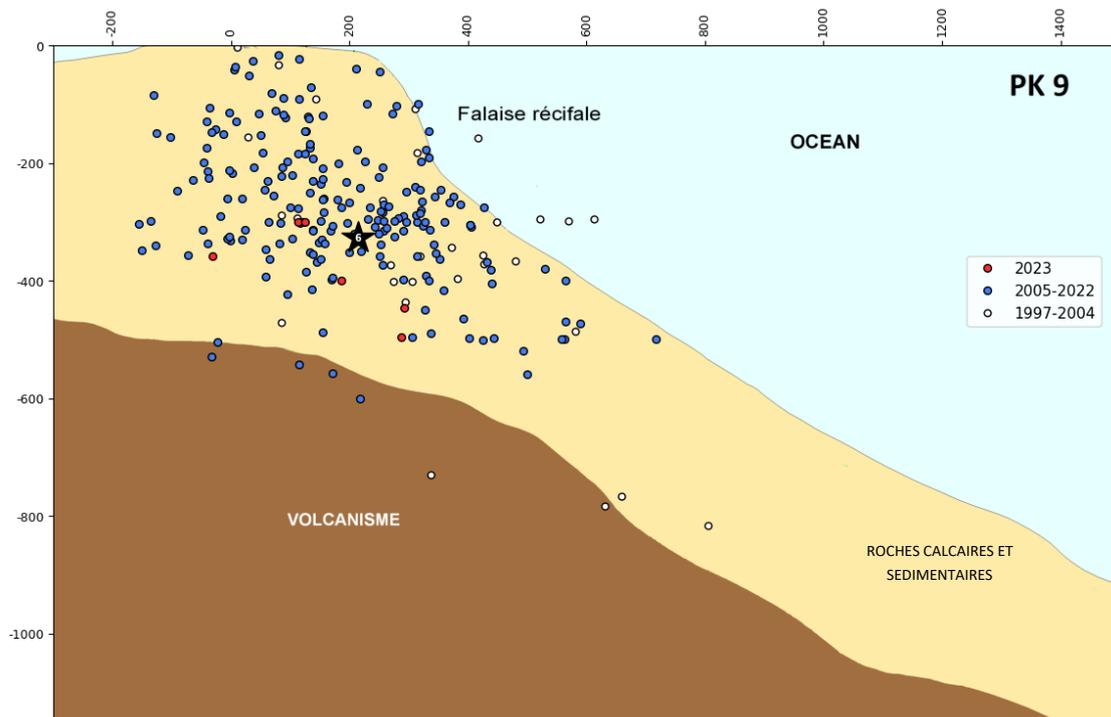


Figure 7 : Projection sur une coupe géologique traversant le secteur Gisèle-Camélia des événements sismiques enregistrés de 1997 à décembre 2023 (cercles colorés par période). L'étoile noire indique l'évènement ayant déclenché une alerte « à 90 secondes » (le 11/10/2007).

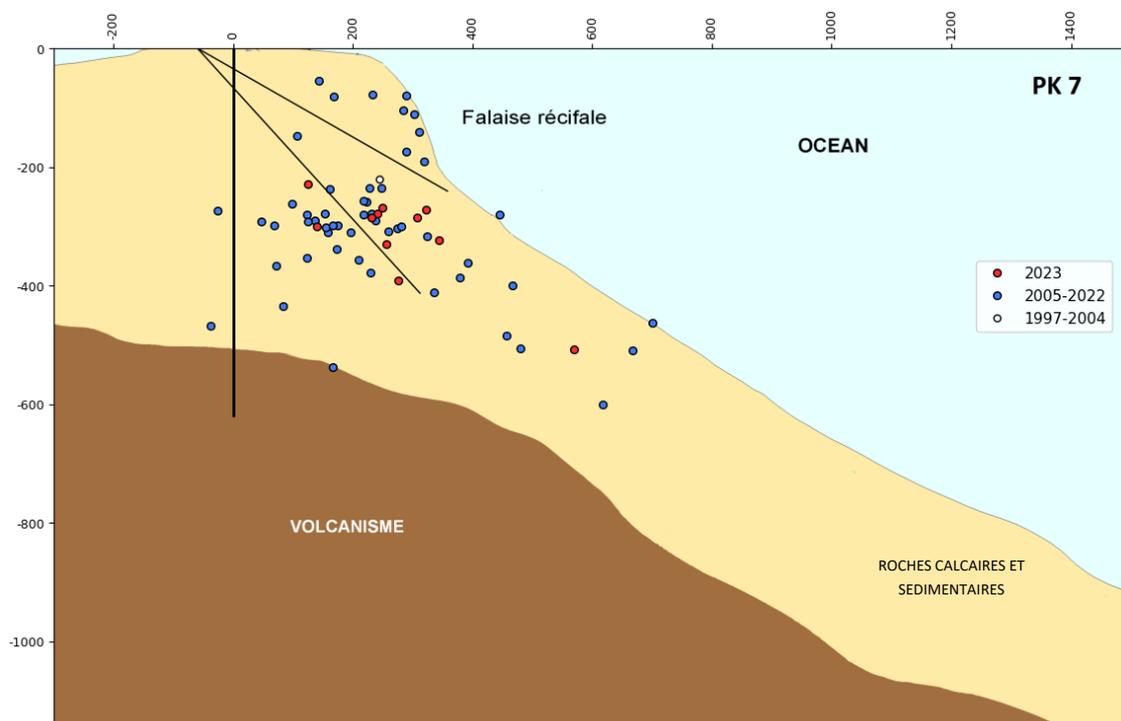


Figure 8 : Projection sur une coupe géologique traversant le secteur Camélia-Hélène des événements sismiques enregistrés de 1980 à décembre 2023 (cercles colorés par période). Les traits noirs indiquent les forages de l'instrumentation de TELSITE.

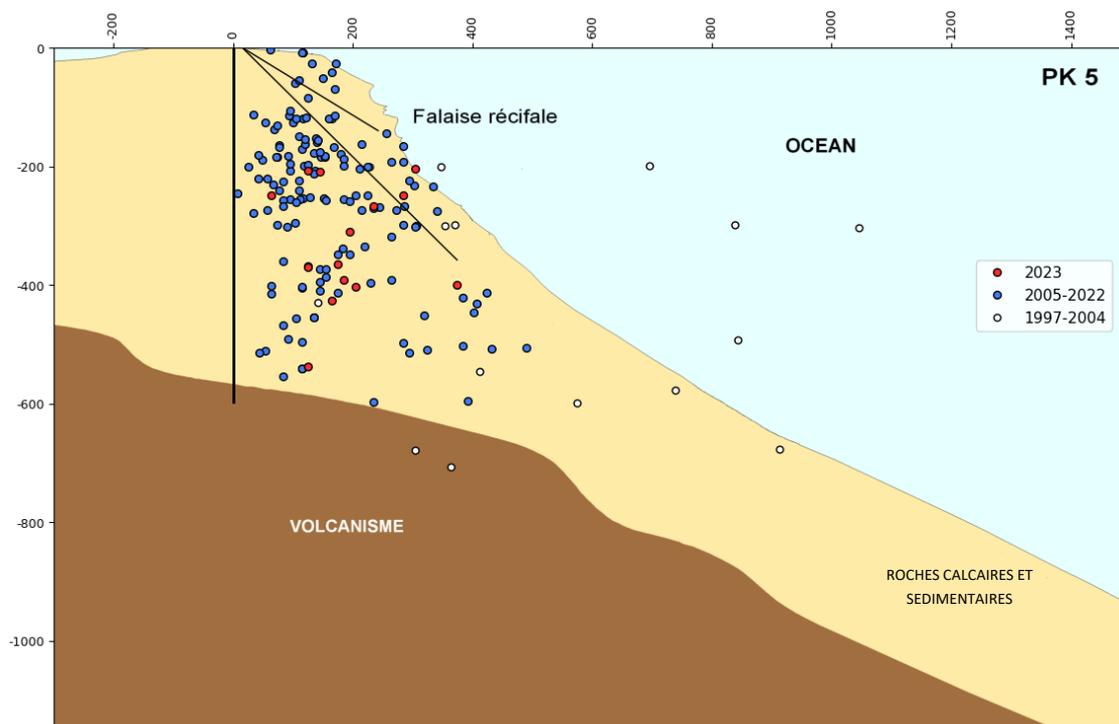


Figure 9 : Projection sur une coupe géologique traversant le secteur Irène des évènements sismiques enregistrés de 1980 à décembre 2023 (cercles colorés par période). Les traits noirs indiquent les forages de l'instrumentation de TELSITE.

3.2.2. Evolution temporelle de l'activité sismique

Les 54 microséismes détectés en 2023 représentent une moyenne de 1,04 évènement par semaine pour l'ensemble de la zone Nord-Est (Figure 10, courbe noire). Ce taux de sismicité est très proche de la valeur de un par semaine considérée comme représentative du niveau 0 de l'indicateur de risque d'un éboulement de grand ampleur (évènement de type 2) et est très inférieur au taux de 10 par semaine associé au passage au niveau 1 (Tableau 7 et Tableau 2). Ce taux moyen reflète une très faible microsismicité dans toute la zone Nord-Est comme le montrent, pour chaque secteur, l'évolution temporelle (Figure 10, barres colorées) et les courbes des nombres d'évènements cumulés (Figure 11) :

- Dans le secteur Françoise, l'activité sismique en 2023, avec 20 évènements détectés, est dans la gamme des valeurs observées depuis 1997.
- Dans le secteur Gisèle-Camélia, 8 évènements ont été enregistrés en 2023. Ce nombre est proche de ceux relevés depuis 2014, seule une augmentation avait été mesurée en 2017.
- Dans le secteur Camélia-Hélène, 10 évènements ont été détectés en 2023. Avant 2018, très peu d'évènements, moins de 5 par an, parfois aucun, étaient enregistrés dans ce secteur. Depuis 2018, le nombre de microséismes est légèrement plus important, sans excéder 13 par an. Ce changement reflète vraisemblablement une meilleure détectabilité dans ce secteur apportée par la station de profondeur de la zone Hélène, implantée lors de la rénovation du système TELSITE de 2018. En particulier 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, 16 évènements ont été enregistrés en 2023 ce qui est du même ordre de grandeur que ce qui avait été observé en 2022 et 2021 (respectivement 19 et 12 évènements).

Comme indiqué précédemment (§3.2.1), pris ensemble, les secteurs Gisèle-Camélia et Camélia-Hélène englobent la zone de glissement considérée comme la plus pénalisante en zone Camélia. À titre informatif, la contribution conjointe de ces deux secteurs est représentée sur la figure des nombres cumulés d'évènements (Figure 11, courbe Camélia "étendue").

En 2023, le taux de microsismicité reste très faible dans tous les secteurs de la zone Nord-Est ; il est en moyenne de 1,04 évènement par semaine.

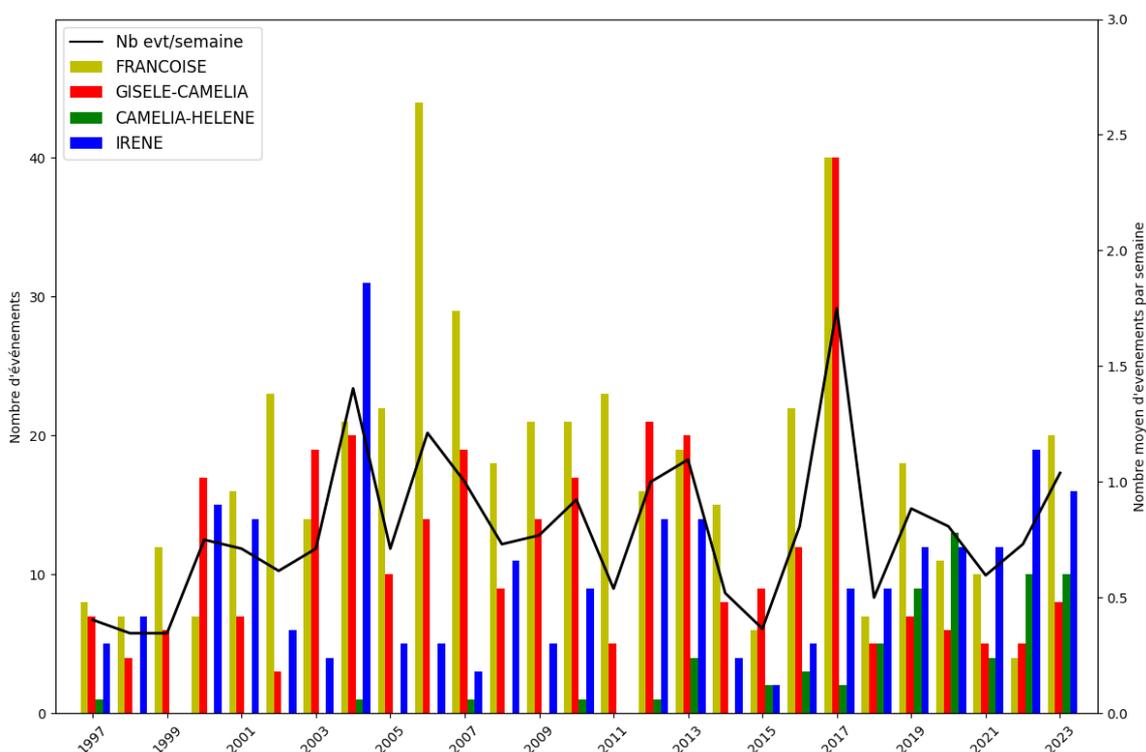


Figure 10 : Évolution temporelle de l'activité microsismique annuelle de 1997 à 2023 pour chacun des secteurs de la zone Nord-Est associés au système TELSITE (barres colorées, axe de gauche) et nombre moyen annuel d'évènements par semaine pour l'ensemble de la zone Nord-Est (courbe noire, axe de droite).

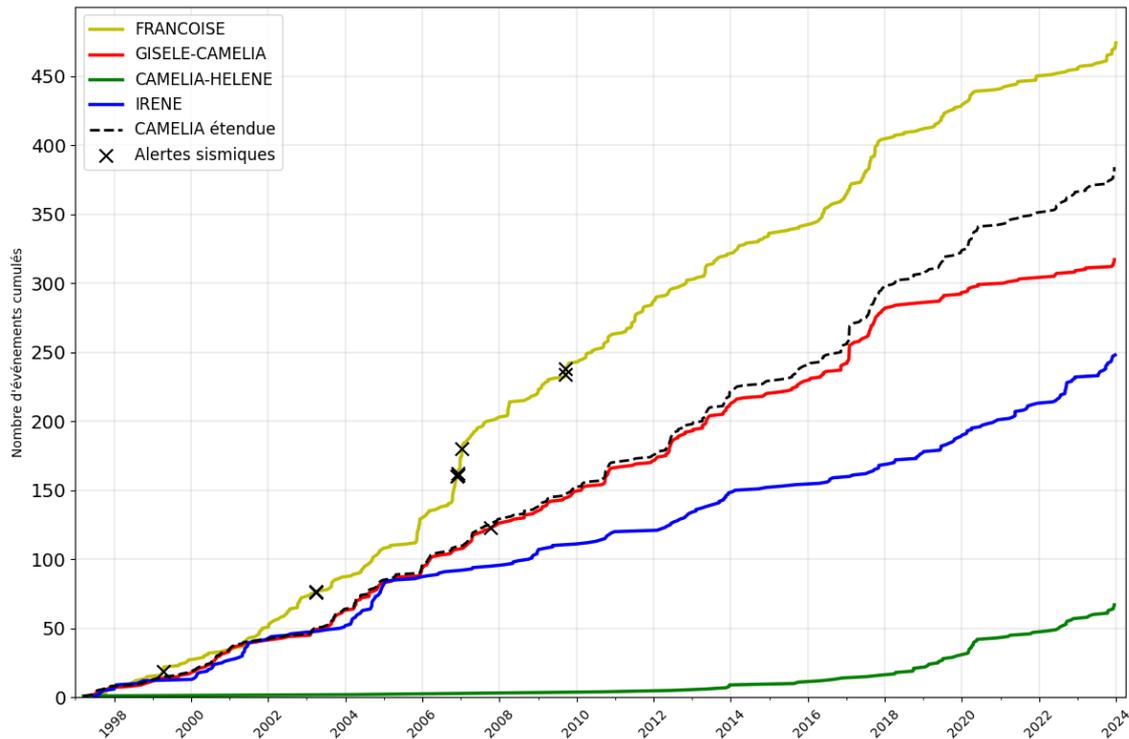


Figure 11 : Courbes du nombre d'événements cumulés de 1997 à 2023 pour chacun des secteurs de la zone Nord-Est.

La courbe noire pointillée (Camélia "étendue") représente la somme des contributions des courbes rouge (Giséle-Camélia) et verte (Camélia-Hélène). Les croix identifient, sur les courbes associées à leur localisation, les microséismes ayant déclenchés des alertes « à 90 secondes ».

3.2.3. 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 à partir de la sismicité polynésienne :

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

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.

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

La gamme des 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 12).

Un écart d'une unité de magnitude correspond à un écart d'un facteur 32 en énergie (voir le détail du calcul p.20) ; cela signifie notamment qu'un séisme de magnitude 0 libère une énergie environ 1 000 fois plus faible qu'un séisme de magnitude 2, lui-même environ 30 000 fois moins énergétique qu'un séisme de magnitude 5. Par ailleurs, en règle générale, aucun lien direct ne peut être établi entre la magnitude d'un fort séisme et ses effets car ces derniers dépendent de la zone touchée (densité de population, qualité des constructions). Néanmoins, de manière générale, les séismes de magnitude inférieure à 5, sauf dans de rares cas, ne provoquent pas de dégât et ceux de magnitude inférieure à 2 sont imperceptibles par la population. Au vu de ces éléments, la sismicité observée à Moruroa depuis la fin des expérimentations nucléaires est qualifiée de microsismicité.

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

En 2023, les magnitudes des événements détectés s'échelonnent entre -1,3 et 1,7 :

- Dans le secteur Française, quatre relâchements de contrainte, dont trois sont les plus forts enregistrés cette année, sont survenus entre le 1^{er} et le 3 octobre (Figure 12). Leurs occurrences en moins de 72 heures et leurs localisations, centrées sur des profondeurs de 300 à 350 m, suggèrent qu'ils font partie d'une même séquence sismique. Leurs magnitudes sont comprises entre 0,8 et 1,7. Notons que l'évènement associé à la plus forte valeur, survenu le 3 octobre, a conduit au dépassement d'un seuil individuel d'alarme en amplitude sur deux stations ce qui n'est pas suffisant pour déclencher une alerte « à 90 secondes ».
- Dans les trois autres secteurs, tous les événements sont de très faibles magnitudes. Celles-ci sont toutes inférieures à 0,8 en Gisèle-Camélia et à 0,3 en Camélia-Hélène et en Irène (Figure 12).

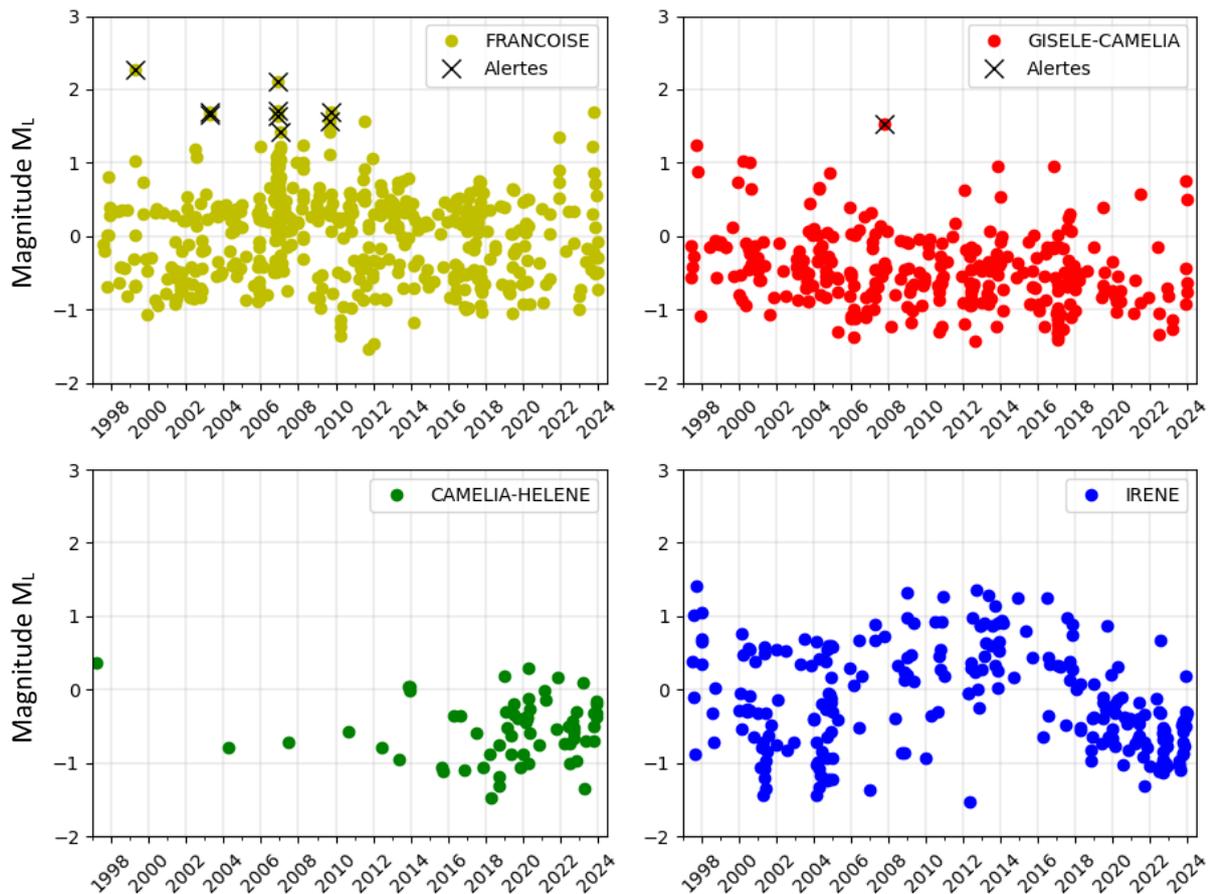


Figure 12 : Distribution temporelle des magnitudes M_L de 1997 à 2023 pour les secteurs Française, Gisèle-Camélia, Camélia-Hélène et Irène. Les croix identifient, sur les points associés à leur magnitude, les microséismes ayant déclenché des alertes « à 90 secondes ».

La distribution des magnitudes est examinée en déterminant le nombre d'évènements pour quatre intervalles de magnitude : les magnitudes inférieures à -1, celles comprises dans les intervalles [-1, 0] et [0, 1], et celles supérieures à 1. Ces répartitions sont exprimées en pourcentage et représentées par des histogrammes (Figure 13). Afin d'examiner l'évolution au cours du temps de la distribution des magnitudes, ces graphiques sont présentés pour l'année 2023 (Figure 13, histogramme de droite) et pour les deux décades précédentes, de 2003 à 2012 (Figure 13, histogramme de gauche) et de 2013 à 2022 (Figure 13, histogramme du centre).

À l'échelle de dix ans, ces histogrammes montrent que :

- la grande majorité (près de 90%) des microséismes ont des magnitudes comprises entre -1 et 1,
- la proportion des magnitudes supérieures à 0 décroît au cours du temps ; celles comprises entre 0 et 1 et celles supérieures à 1 passent respectivement de 42 à 26% et de 5 à 1%,
- la proportion des magnitudes inférieures à 0 augmente au cours du temps ; celles comprises entre -1 et 0 et celles inférieures à -1 passent respectivement de 45 à 62% et de 7 à 11%.

L'histogramme pour 2023 est cohérent avec cette évolution temporelle pour les magnitudes intermédiaires. Par rapport au décompte de la période 2013-2022, la proportion de magnitudes comprises entre -1 et 0

augmente, celle entre 0 et 1 diminue. La part des plus petites magnitudes reste stable. Celle des magnitudes supérieures à 1 est plus importante ; ces quelques pourcents obtenus en 2023 correspondent à deux microséismes détectés dans le secteur Française évoqués précédemment.

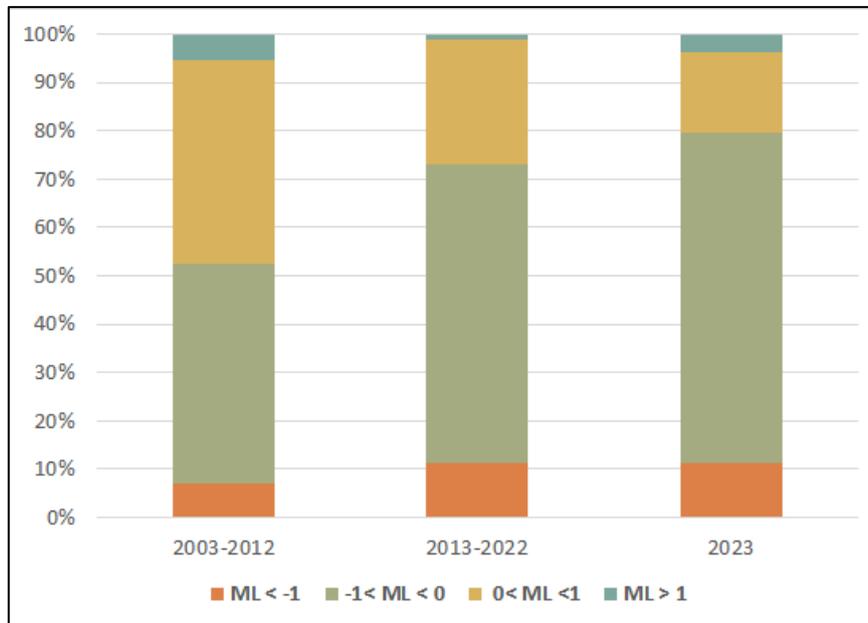


Figure 13 : Distribution, en pourcentage, des relâchements de contraintes détectés en zone Nord-Est en fonction de leur magnitude locale M_L sur les deux dernières décades, 2003-2012 (à gauche) et 2013-2022 (au centre), et sur l'année 2023 (à droite).

La sismicité est par ailleurs 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 exprimée 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.

Pour l'année 2023, la relation (2) conduit à des estimations de moment sismique des relâchements de contrainte comprises entre $2,7 \times 10^{14}$ et $4,6 \times 10^{18}$ dyn.cm (soit entre $2,7 \times 10^7$ et $4,6 \times 10^{11}$ N.m). 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. 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 d'énergie cumulée ainsi calculées au cours du temps (Figure 14, Figure 15 et Figure 16) montrent des niveaux différents selon les secteurs et une évolution par plateau. Les sauts les plus marqués sont produits par les événements de plus forte magnitude, tandis que ceux de faible magnitude (i.e. inférieure à 1), libérant peu d'énergie, n'engendrent que des discontinuités peu marquées sur les courbes. Sur la Figure 15 et la Figure 16, 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 événements à l'origine des sauts en énergie, notamment ceux ayant déclenché une alerte « à 90 secondes ».

- Pour le **secteur Françoise**, l'énergie cumulée depuis 1997 est de $5,7 \times 10^{15}$ ergs (Figure 14 et Figure 15, courbes jaunes). Cette valeur, la plus importante de la zone Nord-Est, est cependant très faible. Elle équivaut en effet à l'énergie qui serait libérée par un seul événement hypothétique de magnitude 2,7 et correspond à une activité qualifiée de microsismique. Les événements ayant donné lieu à des alertes en 1999, 2003, 2006 et 2009 sont à l'origine des discontinuités majeures de la courbe d'énergie cumulée au cours du temps. La discontinuité enregistrée en 2023 résulte des quatre événements début octobre, et plus principalement de celui de magnitude 1,7. Elle représente la quasi-totalité des $3,2 \times 10^{14}$ ergs libérés en 2023.
- Pour le **secteur Irène**, le bilan énergétique cumulé depuis 1997 est de $1,2 \times 10^{15}$ ergs (Figure 14 et Figure 16, courbes bleues), il reste 4 à 5 fois inférieur à celui du secteur Françoise. Alors que de 2009 à 2016, des événements de magnitude ML supérieure à 1 avaient été enregistrés régulièrement, aucun n'a été détecté depuis 2017. Les très petites magnitudes enregistrées en 2023 correspondent à une très faible libération d'énergie, $4,1 \times 10^{12}$ ergs.
- Pour le **secteur Gisèle-Camélia**, l'énergie libérée depuis 1997 reste faible (Figure 14 et Figure 16, courbes rouges) ; elle est de $4,9 \times 10^{14}$ ergs, soit plus de dix fois inférieure à celle du secteur Françoise. Le bilan énergétique pour 2023 est de $1,7 \times 10^{13}$ ergs.
- Pour le **secteur Camélia-Hélène**, le bilan énergétique depuis 1997, de $2,6 \times 10^{13}$ ergs, est le plus faible de la zone Nord-Est (Figure 14 et Figure 16, courbes vertes), de deux ordres de grandeur inférieur à celui du secteur Françoise. L'énergie libérée en 2023 reste stable et très faible, $2,6 \times 10^{12}$ ergs.

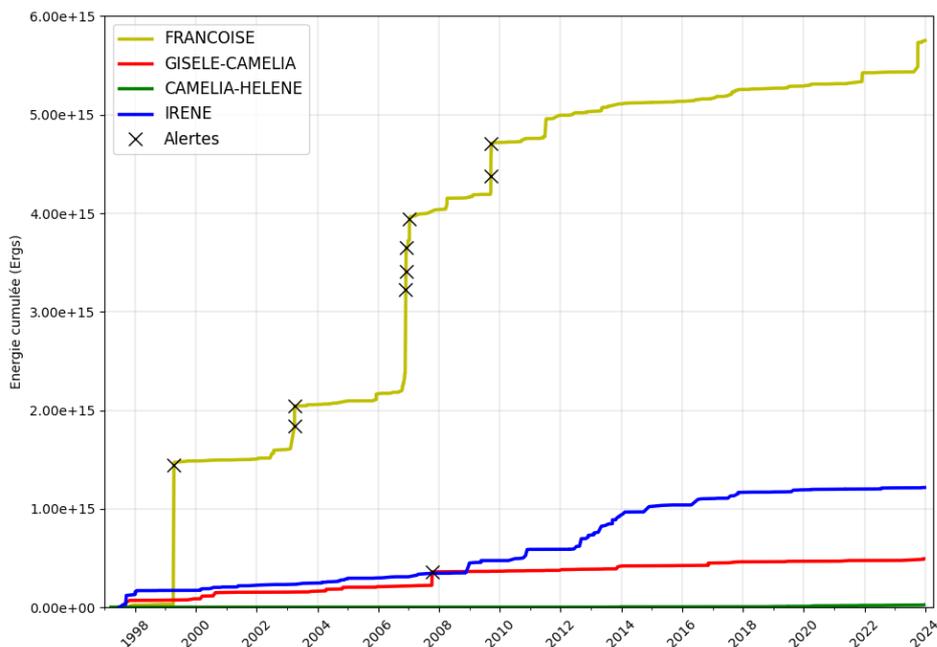


Figure 14 : Comparaison des énergies cumulées de 1997 à fin 2023 pour les quatre secteurs de la zone Nord-Est : Françoise (en jaune), Irène (en bleu), Gisèle-Camélia (en rouge) et Camélia-Hélène (en vert). Les croix identifient, sur les courbes associées à leur localisation, les microséismes ayant déclenché des alertes « à 90 secondes ».

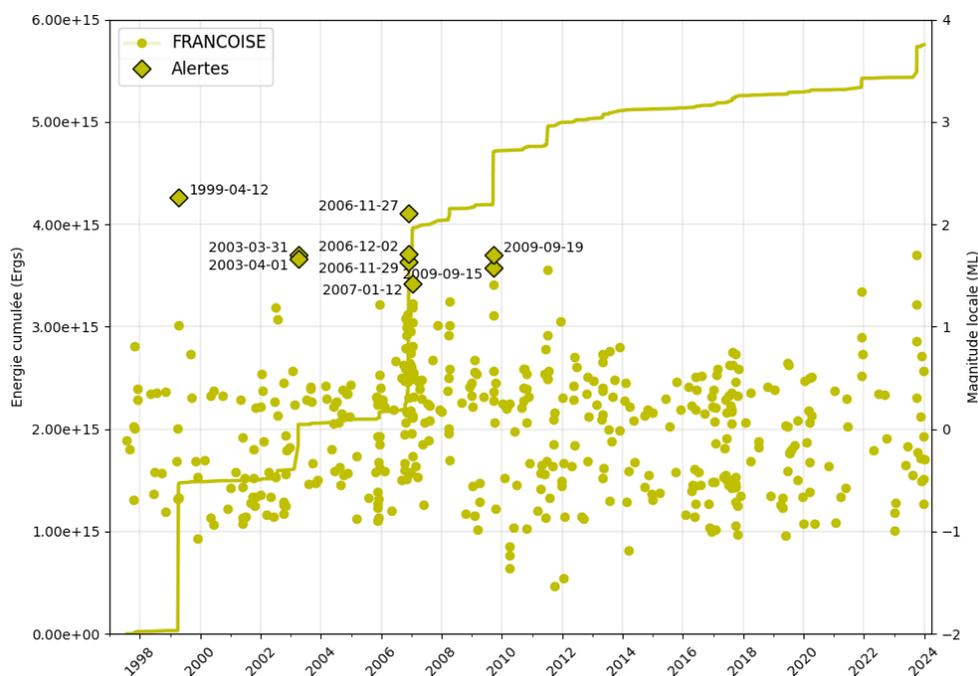


Figure 15 : Énergies cumulées (courbes, axe des ordonnées de gauche) pour les événements de 1997 à fin 2023 et magnitudes M_L associées (cercles, axe des ordonnées de droite) de la zone Françoise. Les losanges étiquetés représentent les magnitudes (axe des ordonnées de droite) des événements ayant déclenché des alertes « à 90 secondes ».

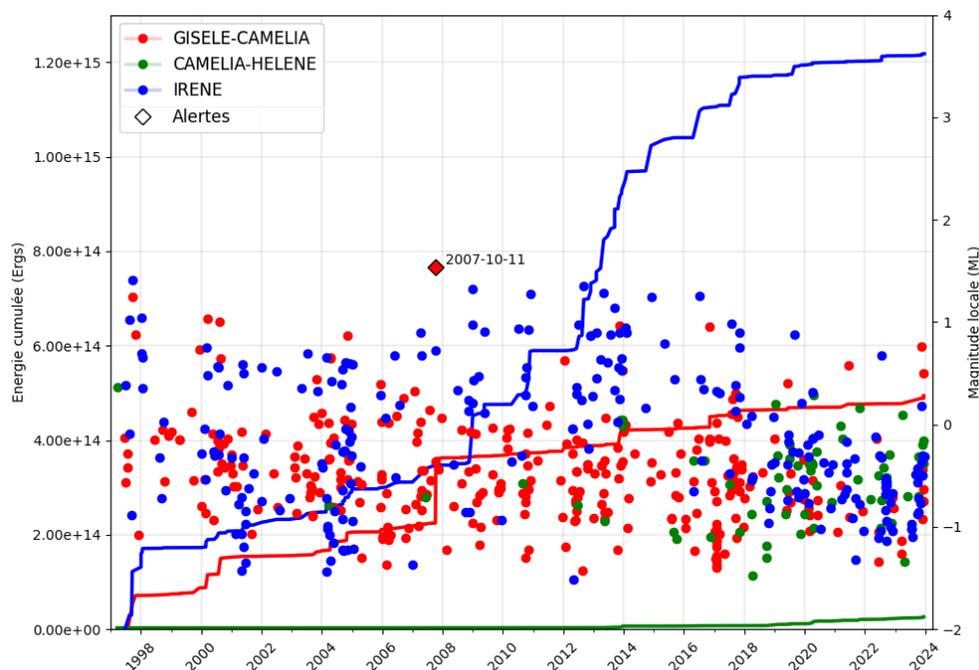


Figure 16 : Énergies cumulées (courbes, axe des ordonnées de gauche) pour les événements de 1997 à fin 2023 et magnitudes M_L associées (cercles, axe des ordonnées de droite) des zones Irène (en bleu), Gisèle-Camélia (en rouge) et Camélia-Hélène (en vert). Le losange étiqueté représente la magnitude (axe des ordonnées de droite) de l'évènement ayant déclenché une alerte « à 90 secondes » en zone Gisèle-Camélia.

Pour l'année 2023, 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 événements enregistrés. C'est dans le secteur Française que l'énergie libérée a été la plus importante. Celle du secteur Gisèle-Camélia est d'un ordre de grandeur inférieur, celles des secteurs Camélia-Hélène et Irène de deux ordres de grandeur inférieurs.

3.3. Déplacements mesurés en surface à partir des données GPS

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. Les mesures représentent ainsi des mouvements relatifs par rapport à une station prise comme référence.

Les données GPS sont examinées sur différentes échelles de temps. Tout d'abord, les mesures des capteurs GPS « équivalents » présents dans le dispositif de surveillance actuel et le précédent sont comparées au premier ordre afin d'obtenir une image globale de l'évolution des mouvements sur une période, au mieux, de trente-deux ans (§3.3.3). Ensuite, l'ensemble des mesures GPS acquises depuis le 1er janvier 2019 par le dispositif actuel est présenté pour visualiser les mouvements récents et leurs vitesses moyennes (§3.3.4).



Figure 17 : Localisation des dix stations GPS du système TELSITE actuel (fond de carte extrait de Google Maps). Les cinq stations marquées par un astérisque, J055, H049, C075, A083 et K107 ont respectivement remplacé les stations JEANNE, HOTEL, GPS1, ALPHA et KILO du système de surveillance précédent.

3.3.1. Le réseau GPS de TELSITE

Le système TELSITE comporte dix stations GPS (Figure 17), leur nom fait référence aux PK où elles sont installées :

- **H049** en bout de digue Hôtel 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.

3.3.2. Estimation des déplacements à partir des données GPS

Les déformations en surface sont estimées en calculant les mouvements relatifs entre deux stations. Pour cela, ce sont les positions relatives des stations qui sont mesurées par rapport à une station de référence. L'évolution au cours du temps de ces positions relatives permet d'évaluer les déplacements par rapport à la station de référence. Pour chaque station considérée, les pentes à long terme, ou tendances, des courbes

des composantes horizontales et verticale de son déplacement relatif permettent d'estimer les vitesses des déformations permanentes, qui sont l'objet de la surveillance. Il faut cependant noter que, dans tout enregistrement GPS à la surface du globe, des variations saisonnières, à l'origine de signaux cycliques, se superposent à la tendance à long terme et entravent l'estimation des éventuelles déformations permanentes. Blewitt et Lavallée (2002)⁸ ont ainsi montré que le biais sur la détermination des vitesses de déformation permanente engendré par ces variations saisonnières pouvait être très important pour des enregistrements d'une durée inférieure à 2,5 ans et devenait négligeable pour des enregistrements continus sur plus de 4,5 ans. Aussi, afin de préserver la fiabilité de leurs estimations, tout en permettant de détecter leurs éventuelles évolutions sur le long terme, les vitesses sont à présent calculées à partir des quatre dernières années de données. Ces estimations nécessitent des enregistrements exempts de coupures significatives. Or, comme détaillé par la suite, certains capteurs ont subi des coupures trop importantes ou trop fréquentes entre 2020 et 2023 pour que leurs vitesses soient évaluées avec fiabilité.

Les vitesses de déplacement, indiquées par la suite, pourront être comparées (Tableau 7 et Tableau 2) :

- aux vitesses observées à l'arrêt des expérimentations nucléaires en 1996 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 ;
- aux vitesses correspondant au passage au niveau 1 de l'indicateur caractérisant le risque d'éboulement de grande ampleur (événement de type 2). Celles-ci sont de 20 mm/mois pour les mouvements horizontaux et de 10 mm/mois pour les mouvements verticaux.

3.3.3. Évolution des déplacements mesurés en surface depuis les années 90

Avant la rénovation du système TELSITE réalisée en 2018, les déplacements en surface étaient examinés à partir des enregistrements d'un plus petit nombre de stations GPS qu'actuellement. Ils étaient estimés par rapport à la position de la station **JEANNE**, équivalente à la station **J055** actuelle, située sur le platier côté lagon en zone stable (Figure 17).

Les mesures de ces capteurs acquises jusqu'en août 2018 avaient permis de caractériser différents mouvements par rapport à la station **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 cette dernière est plus proche de la côte d'une dizaine de mètres. 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.

⁸ Blewitt, G., Lavallée, D., Effect of annual signals on geodetic velocity, J. Geophys. Res., 107 (B7), 2002.

- La station **KILO**, équivalente de **K107** en zone Française, montrait un mouvement faible avec une composante vers l'est et une composante en subsidence, non quantifiables en raison de fortes perturbations saisonnières et des répercussions d'affouillements présents sous la fondation de la station.
- La station **HOTEL**, située en zone Irène, équivalente de **H049** sur la digue Hôtel, montrait des déplacements mesurables mais non significatifs.

JEANNE, **GPS1** et **ALPHA** sont les stations pour lesquelles les enregistrements les plus complets sont disponibles jusqu'à leur remplacement par les stations actuelles **J055**, **C075** et **A083** respectivement (Figure 17). **GPS1** et **ALPHA** sont par ailleurs les stations qui montraient les déplacements les plus importants par rapport à la station de référence **JEANNE**. Les données de ces stations et de celles équivalentes dans le système de surveillance actuel ne peuvent pas être directement raccordées pour obtenir des courbes temporelles continues, mais leur juxtaposition à la même échelle sur un même graphique permet de comparer l'évolution récente aux mouvements plus anciens.

Les données des déplacements relatifs par rapport à **JEANNE** de **GPS1**, disponibles de 1992 à 2018, et celles de **ALPHA**, de 2006 à 2018, sont ainsi mises en regard respectivement des données de déplacements relatifs par rapport à **J055**, des stations **C075** et **A083** (Figure 18) :

- Au début des années 90, les déplacements Nord-Sud et verticaux de **GPS1** s'effectuent avec des vitesses de l'ordre de 2 et 1 mm/mois respectivement, valeurs illustrées par les droites tiretées. Ces vitesses, mesurées à cette période et représentatives d'une situation normale, sont utilisées comme vitesses de référence.
- Les déplacements Nord-Sud et verticaux de **GPS1** montrent un net et progressif ralentissement jusqu'en 2000, associé à l'arrêt des expérimentations nucléaires.
- Les vitesses mesurées depuis 2018 sont globalement dans la continuité de celles mesurées juste avant la rénovation du système de surveillance. La comparaison des mesures des stations « équivalentes » illustre ainsi une stabilisation des vitesses de déplacements depuis 2000 à une valeur très faible. Les composantes verticales laissent entrevoir un faible ralentissement de la station **GPS1** qui semble avoir débuté à partir de la fin de l'année 2013.

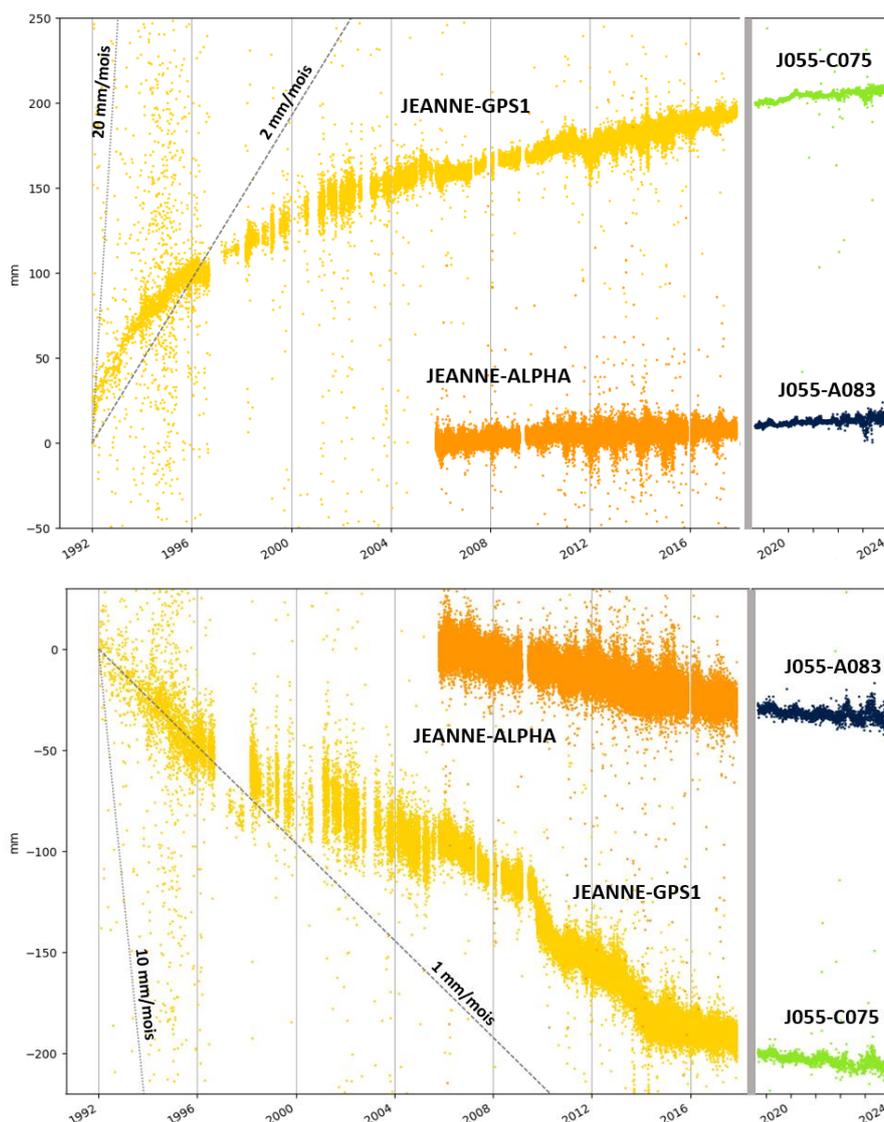


Figure 18 : Comparaison des déplacements relatifs des stations GPS1 (en jaune) et ALPHA (en orange) par rapport à la station de référence JEANNE du dispositif de surveillance antérieur à 2018, avec les déplacements relatifs de C075 (en vert) et A083 (en bleu foncé) par rapport à J055 du dispositif actuel. En haut, sont représentées les composantes Nord des déplacements, en bas les composantes verticales. Les barres verticales grises rappellent que les données sont simplement juxtaposées à la même échelle sur le même graphique afin d'être comparées. Les droites représentent les vitesses de référence (tiretées et pointillées gris) définies dans le §3.3.2 et dans le Tableau 7.

3.3.4. Déplacements en surface mesurés par GPS depuis 2019

Les données des stations GPS actuelles sont disponibles depuis 2018, mais pour ne pas surcharger les graphiques présentés dans les bilans annuels, les enregistrements sont affichés sur les cinq dernières années. Comme indiqué plus haut, lorsque les données le permettent, les vitesses horizontales et verticales sont estimées sur les quatre dernières années.

■ Déplacements mesurés par rapport à la station J055

Les déplacements mesurés par GPS depuis 2019 sont tout d'abord examinés par rapport à la station **J055** située en zone stable côté lagon. Lorsque les séries temporelles de mouvement relatif ne présentent pas de lacunes trop importantes sur la période 2020-2023, 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. À titre d'exemple, des pentes moyennes positives sur la composante Est-Ouest ou sur la composante Nord-Sud traduisent respectivement des déplacements vers l'Est ou vers le Nord, tandis qu'une tendance négative sur 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 19) indiquent des mouvements faibles par rapport à la station **J055** :

- **K107** : très bruitées et soumises à des variations saisonnières fortes et irrégulières, les mesures ont par ailleurs subi à plusieurs reprises à partir de janvier 2022 des coupures dont d'importantes en 2023. L'antenne de la station **K107** est fréquemment endommagée par les tempêtes et doit alors être remplacée lors de missions spécifiques sur site. Les mesures n'étant pas continues sur les quatre dernières années, les vitesses de déformation permanente ne peuvent pas être déterminées. **Au vu des données de 2019 à 2021, l'occurrence d'un mouvement important peut cependant être écartée.**
- **G092** : un très faible déplacement vers le Nord-Nord-Est de 0,05 mm/mois est mesuré sur les quatre dernières années. Les mouvements verticaux sont peu perceptibles.
- **A083** : évalués sur la période 2020-2023, les faibles déplacements vers l'Est-Nord-Est et en subsidence, déjà décelés les années précédentes, sont de l'ordre de 0,06 et 0,05 mm/mois respectivement. Ces mouvements montrent une tendance en ralentissement par rapport à ceux de 0,25 mm/mois vers l'Est-Nord-Est et de 0,2 mm/mois en subsidence estimés entre 2016 et août 2018 pour la station **ALPHA**.

Les mouvements, par rapport à la station J055, des quatre stations situées à proximité de la zone Hélène, **P077**, **T077**, **L075** et **C075**, sont toujours faibles (Figure 20). Leur composante horizontale est orientée vers le Nord à Nord-Ouest et une faible subsidence est observée. Seules les vitesses de **P077**, **T077** et **L075** peuvent être calculées sur les quatre dernières années :

- Les vitesses de déplacement horizontal des stations **P077**, **T077** et **L075** sont respectivement d'environ 0,04 mm/mois vers le Nord-Ouest, 0,08 mm/mois vers le Nord, et 0,13 mm/mois vers le Nord-Ouest.
- Les vitesses de subsidence des stations **P077**, **T077** et **L075** sont estimées respectivement à 0,05 mm/mois, 0,07 mm/mois et 0,06 mm/mois.

La station **C075**, soumise aux effets des tempêtes, a subi à partir de mars 2022 plusieurs coupures ayant nécessité des interventions sur site. Déjà remplacé trois fois en 2022, son radôme a dû l'être à nouveau en octobre 2023 suite à une panne survenue fin septembre. En raison de ces discontinuités et coupures, les courbes obtenues pour cette station à partir de mars 2022 sont à considérer avec prudence et ses vitesses ne peuvent pas être calculées sur les quatre dernières années. Les mesures collectées avant les avaries de 2022 permettent d'estimer les ordres de grandeur de sa vitesse de déplacement 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 celles de l'ancienne station **GPS1**. **Elles suggèrent par ailleurs que le ralentissement révélé sur le mouvement de GPS1 se poursuit après 2018** : la composante Nord de ce mouvement 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 ces mesures sont les plus sujettes aux variations saisonnières au sein de la zone Hélène. Les séries temporelles des déplacements étant relativement courtes, ces perturbations peuvent biaiser l'estimation des déformations permanentes.

Exposée aux tempêtes, la station la plus à l'est, **H049**, subit régulièrement des dégradations interrompant l'acquisition des mesures (Figure 21) et nécessitant des actions spécifiques⁹ sur site.

Les courbes de la station **E071** montrent également, dans une moindre mesure, des lacunes (Figure 21). Celle visible en 2023 résulte d'une période d'environ un mois et demi (de début juillet à mi-août) durant laquelle ce capteur a subi chaque jour des coupures partielles. Les mesures quotidiennes étaient par conséquent estimées à partir d'un moindre nombre d'enregistrements ; leur fiabilité étant ainsi dégradée, elles ont été écartées.

En raison de ces aléas et des délais d'intervention, les périodes de données continues sont trop courtes (Figure 21) pour calculer les vitesses de déformation permanente de stations **E071** et **H049** sur les quatre dernières années. Les mesures montrent toutefois l'absence de déplacements significatifs par rapport à **J055** (Figure 21) :

- **E071** : sur les sections de mesures exploitables, de début 2019 à avril 2021 et de septembre 2021 à mi-2023, **aucun mouvement global de la station E071, ni horizontal, ni vertical, n'est détecté**. Celles-ci sont cependant trop courtes pour estimer avec fiabilité les déformations permanentes. Aucune cause n'a pu être mise en évidence pour expliquer le saut, de l'ordre de -2 mm, début juin 2020 sur sa composante Nord (indiqué par un cercle sur la Figure 21).
- **H049** : en 2023, comme régulièrement par le passé, l'antenne de **H049**, arrachée en juillet, a été remplacée en octobre. Les mesures de **H049** depuis 2019, trop parcellaires et discontinues, ne permettent pas d'identifier et d'estimer de manière robuste des déplacements. **Elles permettent en revanche d'écarter l'occurrence de déformations permanentes rapides entre mars 2019 et mai 2020 et entre avril 2022 et juillet 2023.**

⁹ Il est à noter qu'en mars 2019, suite à une tempête l'ayant dégradée, l'antenne de la station H049 a été positionnée légèrement en retrait de son emplacement initial.

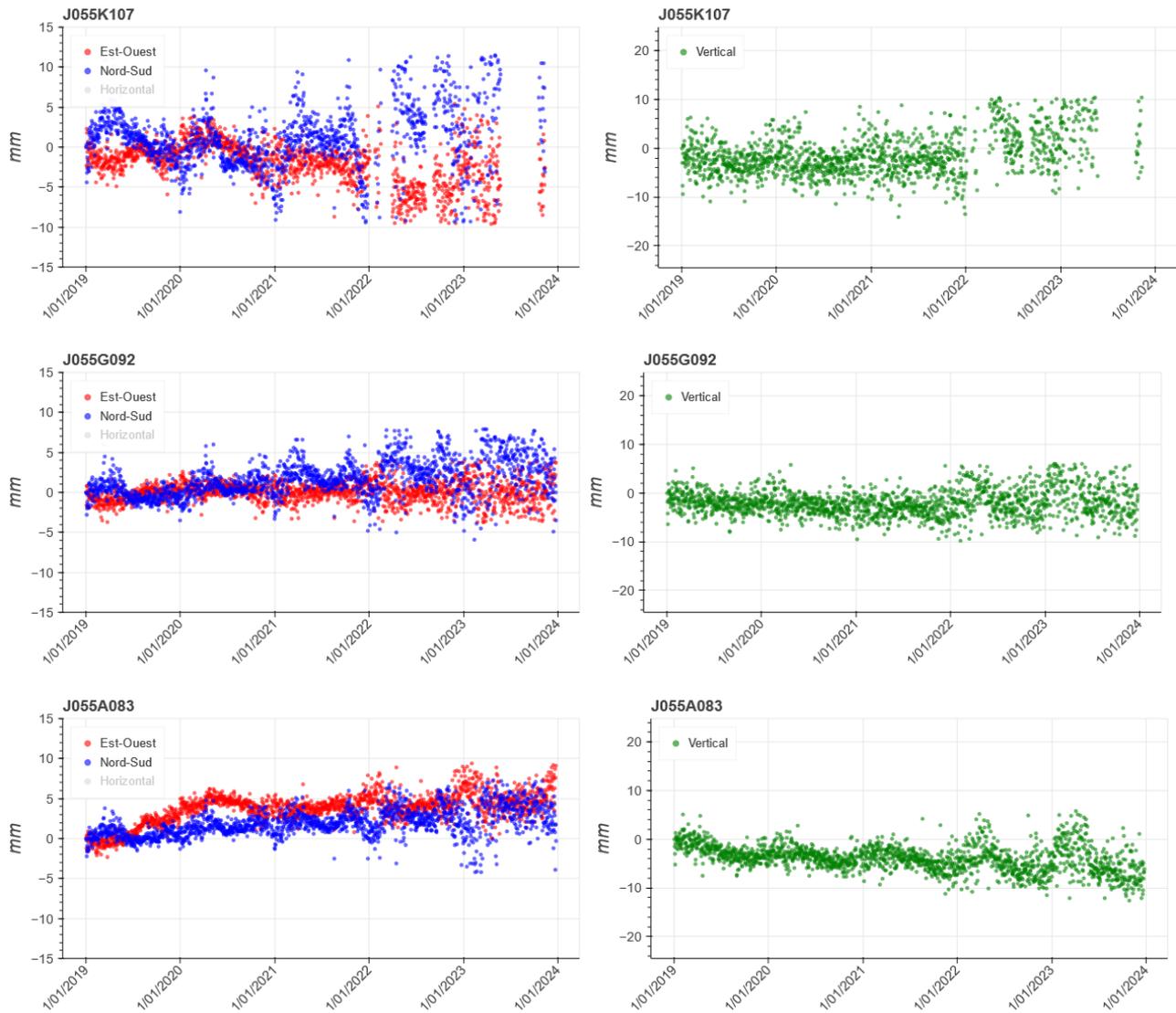


Figure 19 : A gauche, composantes Est (en rouge) et Nord (en bleu), à droite composante verticale (en vert) des déplacements par rapport à la station GPS de référence J055 des stations K107, G092 et A083 de janvier 2019 à décembre 2023.

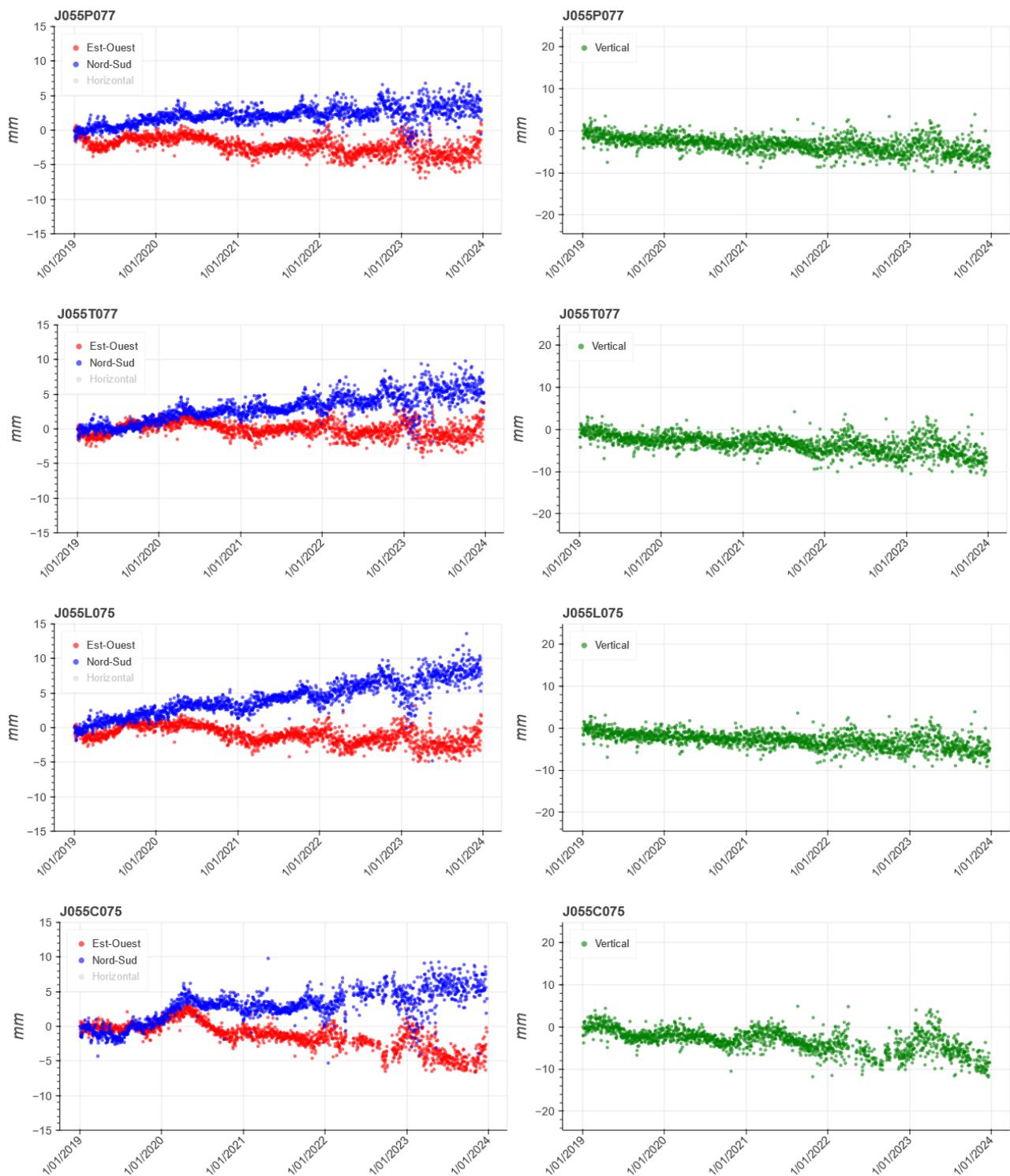


Figure 20 : A gauche composantes Est (en rouge) et Nord (en bleu), à droite composante verticale (en vert) des déplacements par rapport à la station GPS de référence J055 des stations en zone Hélène P077, T077, L075 et C075 de janvier 2019 à décembre 2023.

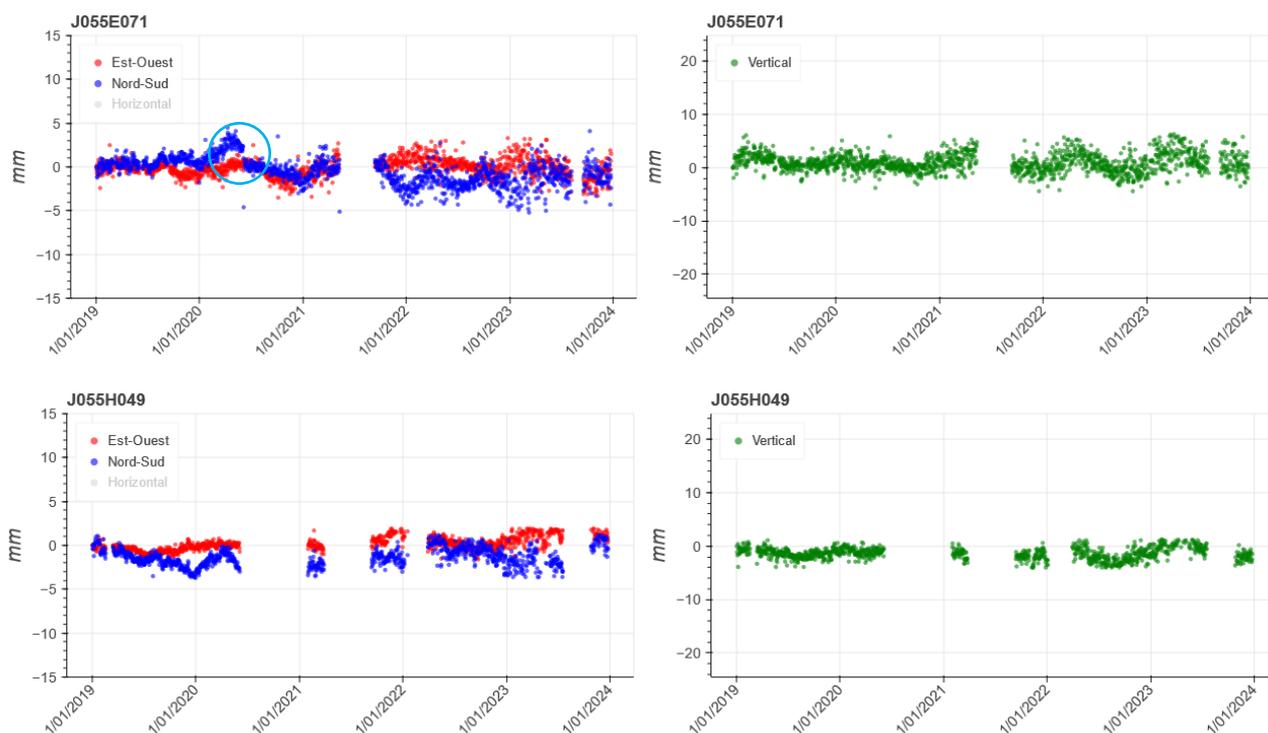


Figure 21 : A gauche composantes Est (en rouge) et Nord (en bleu), à droite composante verticale (en vert) des déplacements par rapport à la station GPS de référence J055 des stations E071 et H049 de janvier 2019 à décembre 2023. Le cercle bleu clair indique un saut, dont la cause est inconnue, dans 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** dans le secteur Hélène est également utilisée comme station de référence pour calculer les déplacements relatifs des trois autres stations implantées dans ce secteur : **T077**, **L075** et **C075**.

Ces déplacements mesurés depuis 2019 sont représentés sur la Figure 22 par leurs composantes Est-Ouest, Nord-Sud et verticales, respectivement en rouge, bleu et vert. Les mesures permettent d'examiner plus en détail les déformations au sein de ce secteur et les vitesses relatives :

- Les trois stations montrent de très faibles mouvements horizontaux par rapport à **P077**. Estimées sur les quatre dernières années, la vitesse de **T077** est de 0,04 mm/mois vers le Nord-Est, celle de **L075** de 0,09 mm/mois vers le Nord. Celle de **C075**, évaluée sur la période précédant les coupures en mars 2022, est d'environ 0,03 mm/mois vers le Nord-Nord-Ouest.
- Une très légère subsidence est observée pour **T077** (environ 0,02 mm/mois), tandis que **L075** et **C075** ne montrent pas de mouvement vertical appréciable.

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

Pour rappel, la station **C075** a subi quatre coupures entre mars 2022 et octobre 2023. En raison des discontinuités qu'elles ont engendrées et des dysfonctionnements ayant nécessité le remplacement de l'antenne, les données ne sont pas suffisamment fiables sur cette période pour être interprétées.

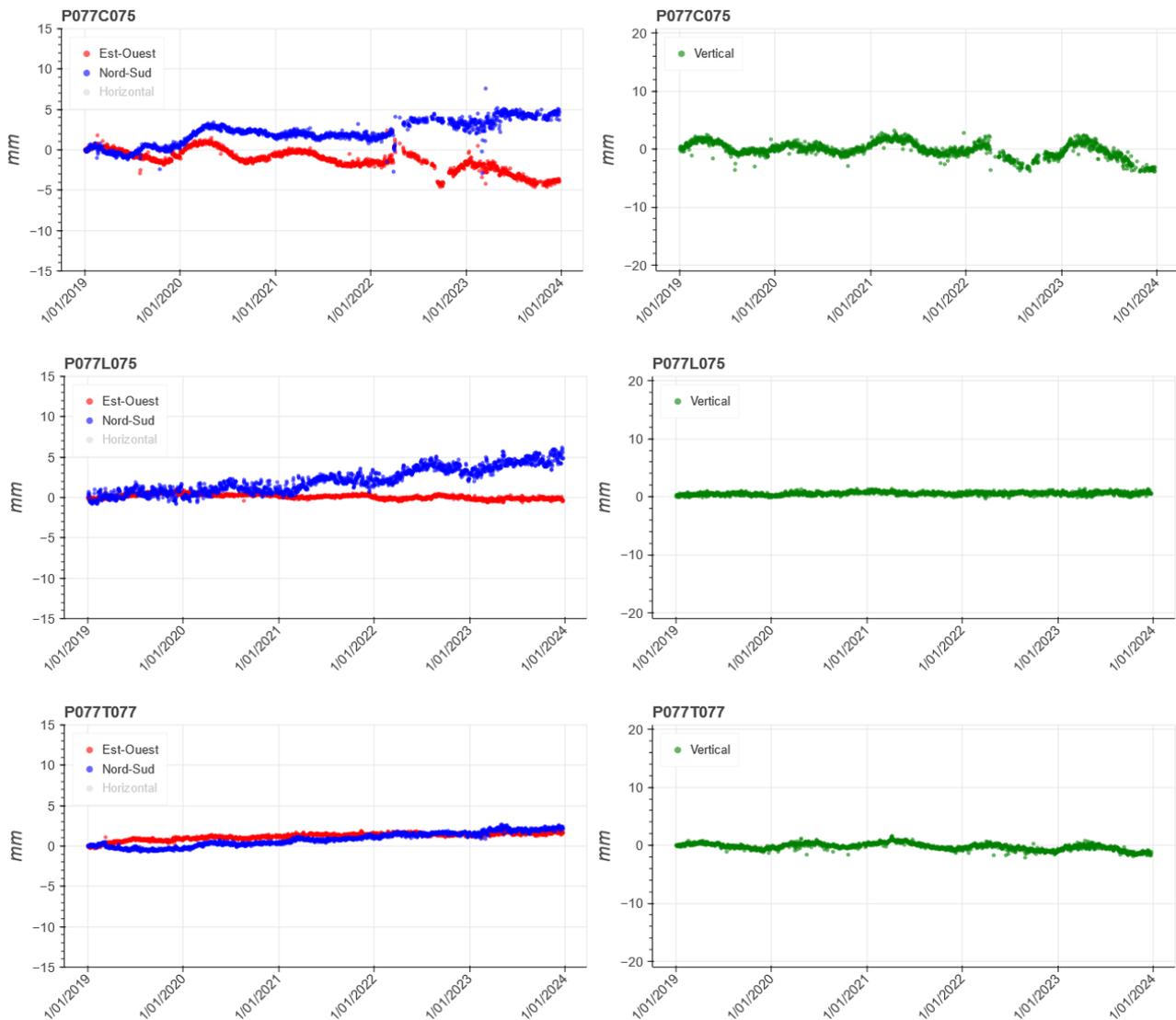


Figure 22 : A gauche composantes Est (en rouge) et Nord (en bleu), à droite composante verticale (en vert) des déplacements par rapport à la station GPS de référence P077 des stations C075, L075 et T077 de janvier 2019 à décembre 2023.

3.3.5. Synthèse des mesures GPS

La plupart des données GPS du système TELSITE actuel sont désormais interprétables en termes de déformations permanentes au cours des quatre dernières années. Cette durée est retenue pour permettre le suivi des évolutions sur le long terme, tout en palliant les effets des variations transitoires (notamment saisonnières) et du « bruit » affectant les séries temporelles. Néanmoins, dans le cas présent, les déformations permanentes mesurées à l'aide de cette méthode sont faibles et proches de l'incertitude de la mesure, il convient donc de rester prudent quant à leur interprétation. Les vitesses de **H049**, **E071**, **K107** et **C075** ne

peuvent pas être calculées sur cette période de quatre ans, ces stations ayant subi quelques coupures. Les données disponibles permettent cependant de caractériser les déplacements par rapport à **J055** de **H049**, **E071** et **K107**, pour lesquelles l'occurrence de mouvements importants est écartée, et de **C075** pour laquelle les vitesses peuvent être estimées entre septembre 2018 et mars 2022. Il faut noter que cette période est plus courte (environ 3,5 ans) que la période de 4 ans susmentionnée et légèrement décalée dans le temps.

Peu d'évolutions sont observées depuis la rénovation de dispositif de surveillance ; en effet, les principales tendances observées antérieurement 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 à Nord-Ouest. Les données suggèrent que ce mouvement est légèrement plus faible côté lagon. 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 Française, particulièrement bruitées, écartent la possibilité de mouvements importants.

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 depuis la fin des expérimentations nucléaires, une stabilisation des vitesses mesurées en surface.

3.4. Mouvements mesurés en profondeur par extensométrie

Dans chacune des zones Irène, Hélène et Française, les mouvements des flancs de l'atoll sont surveillés par deux extensomètres installés dans des forages inclinés latéraux (FIL), l'un à 30° et l'autre à 45° par rapport à l'horizontale (Tableau 3 et Tableau 4).

Les données d'extensométrie sont examinées sur différentes échelles de temps. Tout d'abord, les mesures des FIL « équivalents » présents dans le dispositif de surveillance actuel et le précédent sont comparées au premier ordre afin d'obtenir une image globale de l'évolution des mouvements sur une période de vingt-sept ans (§3.3.3). Ensuite, l'ensemble des mesures d'extensométrie acquises depuis le 1er janvier 2019 par le dispositif actuel est présenté pour visualiser les mouvements récents, plus particulièrement ceux de 2023, et leurs vitesses moyennes (§3.3.4).

3.4.1. Dispositif de mesures extensométriques

Dans chaque FIL, les mesures d'extensométrie permettent le suivi des déplacements d'un câble gainé ancré en fond de 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 en surface où sont situées les têtes de forage.

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 conçus pour mesurer des déplacements conséquents, mais également des faibles mouvements, tels que ceux actuellement observés, c'est à dire inférieurs à 1 cm/an.

Ce dispositif dispose d'une dynamique de mesure de l'ordre de $\pm 1,10$ m ; au-delà, une intervention humaine sur site est nécessaire pour recentrer le système de mesure. 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 5 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 5 : Profondeurs d'ancrage et longueurs des câbles des extensomètres dans les forages inclinés latéraux (FIL) du système TELSITE.

3.4.2. Estimation des mouvements par extensométrie

Chaque dispositif d'extensométrie dans les FIL a pour objectif de mesurer les mouvements des terrains en fond de forage par rapport aux plateformes en surface. **Si ces terrains s'éloignent des têtes de forage, ils**

entraînent le déroulement du câble sur son cabestan, ce qui se traduit par une mesure de déplacement positive.

Des déplacements négatifs sont également enregistrés. Ceux-ci ne rendent pas compte des mouvements naturels des terrains surveillés en profondeur, un déplacement de ces roches vers le haut étant inenvisageable. Par ailleurs, les mesures GPS écartent l'hypothèse d'un affaissement des plateformes où sont situées les têtes de forage. Ainsi, un déplacement négatif peut être le résultat des sollicitations manuelles effectuées dans le cadre de la maintenance ou être associé à un relâchement des frottements exercés sur les câbles dans le forage. Un tel relâchement conduit à une remise en tension du câble qui se traduit par une mesure négative.

Auparavant, tous les déplacements mesurés, positifs ou négatifs, étaient représentés dans le bilan annuel. **À présent, afin de mieux mettre en valeur les mouvements d'intérêt pour la surveillance géomécanique, seules les courbes rendant compte de déplacements positifs sont présentées.**

Les vitesses des déplacements mesurées dans les FIL, indiquées par la suite, pourront être comparées (Tableau 7 et Tableau 2) :

- à la vitesse de 2 mm/mois observée en 1996 à l'arrêt des expérimentations nucléaires et représentative d'une situation normale ;
- à celle de 20 mm/mois correspondant au passage au niveau 1 de l'indicateur caractérisant le risque d'éboulement de grande ampleur (événement de type 2).

3.4.3. Évolution des mesures extensométriques depuis les années 90

Lors de la rénovation du système TELSITE, l'instrumentation de la zone Camélia n'a pas été reconduite 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 de l'ordre de 0,05 mm/mois 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.

La zone Hélène n'ayant pas été équipée de FIL avant 2018, seules les données actuelles d'extensométrie en Irène et Françoise peuvent être mises en regard des mesures précédemment acquises. Même dans ces deux zones, les dispositifs de mesure, implantés dans de nouveaux forages, ont des caractéristiques différentes

des précédents. C'est pourquoi, leurs enregistrements sont différenciés sur les représentations graphiques de la Figure 23. Néanmoins, les mesures de 1996 à 2018 des **FIL 5.45** et **10.45** du système précédent sont suffisamment complètes pour être comparées au premier ordre à celles des FIL actuels **5.45** et **10.45** respectivement :

- Lorsque les expérimentations nucléaires ont été stoppées, les mouvements des **FIL 5.45** et **10.45** étaient de l'ordre de 1 à 2 mm/mois. Le **FIL 10.45** montrait à cette période la vitesse la plus importante, de l'ordre de 2 mm/mois. Cette valeur, illustrée par la droite tiretée, est utilisée comme vitesse de référence, représentative d'une situation normale. Les mouvements dans ces deux FIL se sont ensuite poursuivis avec des vitesses globales proches ou inférieures à cette valeur.
- Les vitesses des données des **FIL** actuels **5.45** et **10.45** sont dans la continuité de celles mesurées juste avant la rénovation du système, mais sont globalement nettement inférieures à celles enregistrées au cours des vingt années précédentes. Pour les deux FIL considérés, la juxtaposition des données montre ainsi la stabilisation des mouvements en profondeur avec un très faible niveau de vitesse de déplacement.

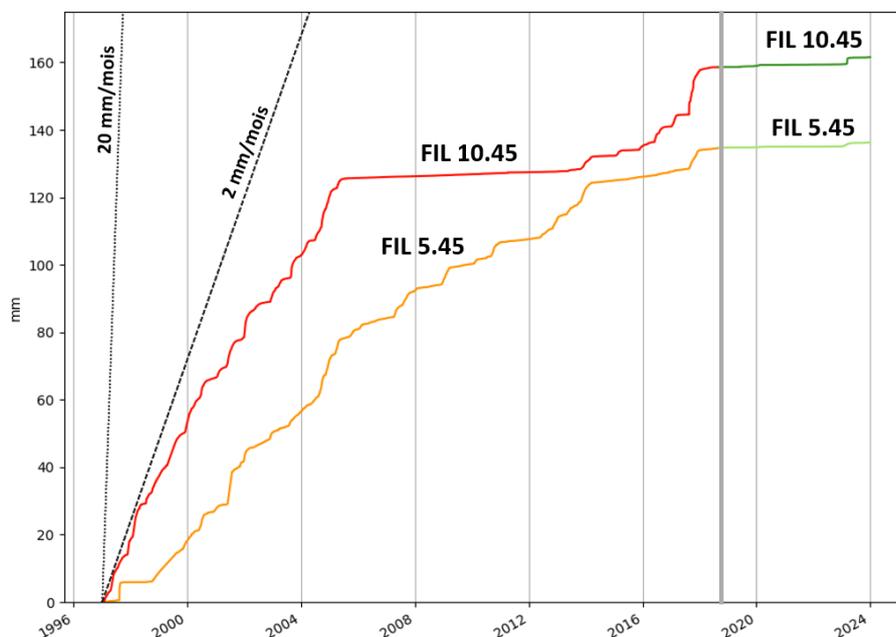


Figure 23 : Comparaison des données d'extensométrie des FIL 5.45 (en jaune) et 10.45 (en rouge) acquises par le dispositif de surveillance antérieur à 2018 avec, respectivement, les données des FIL 5.45 (en vert clair) et 10.45 (en vert foncé) du dispositif actuel. La barre verticale grise rappelle que les données des deux dispositifs ne peuvent pas être regroupées dans un même jeu de données. Elles sont juxtaposées pour permettre leur comparaison. Les droites représentent les vitesses de référence (tiretés et pointillés gris) définies dans le §3.3.2 et dans le Tableau 7. Le long palier du FIL 10.45 à partir de fin 2004 à mi-2013 est interprété comme le blocage du câble avant la reprise des déplacements mi-2013.

3.4.4. Mouvements en profondeur mesurés dans les FIL

Les données des extensomètres du système TELSITE actuel sont disponibles depuis 2018, mais pour ne pas surcharger les graphiques présentés dans les bilans annuels, les données sont affichées sur les cinq dernières années. Par ailleurs, pour faciliter les comparaisons, les échelles verticales des figures qui suivent, sont toutes identiques. Il est à noter que les déplacements cumulés ne dépassent jamais 3 mm sur 5 ans.

En zone Irène, les mesures du **FIL 5.45** (Figure 24) montrent un déplacement cumulé de 1,6 mm depuis 2019. Jusqu'à fin 2022, les mouvements sont très faibles. En 2023, une légère accélération, de janvier à mi-mai, a induit un déplacement d'environ 1 mm, équivalent à une vitesse d'environ 0,2 mm/mois. Depuis, l'évolution est à nouveau très faible. **Sur l'ensemble de l'année 2023, la vitesse moyenne du FIL 5.45 est de 0,08 mm/mois.**

Le déplacement cumulé depuis 2019 est de 2,8 mm pour le **FIL 5.30** (Figure 24). L'évolution est très faible avec quelques accélérations plus ou moins marquées. Des déplacements de 1,0 mm et de 0,6 mm en quelques jours sont notamment enregistrés début 2019 et en août 2022, représentant respectivement des vitesses de l'ordre de 6 et 4 mm/mois. En 2023, l'évolution, irrégulière, est globalement faible. **La vitesse moyenne du FIL 5.30 calculée sur l'année 2023 est de 0,05 mm/mois.**

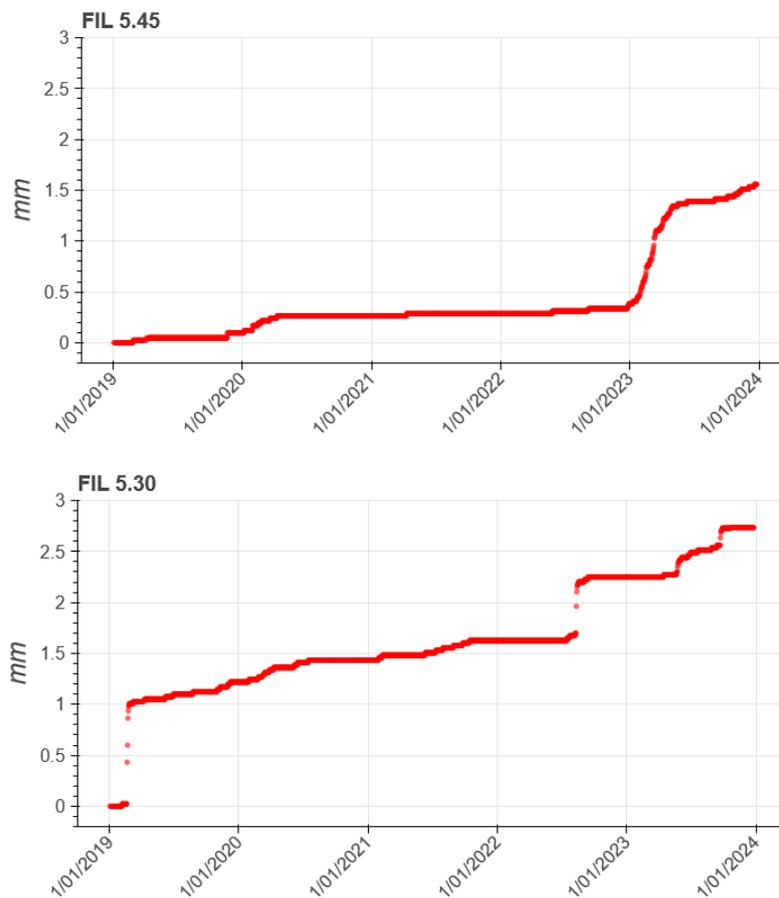


Figure 24 : Déplacements mesurés de janvier 2019 à décembre 2023 par les câbles implantés en zone Irène dans les forages inclinés de TELSITE, en haut, à 45° et, en bas, à 30°.

En zone Hélène, les mesures montrent des déplacements cumulés depuis 2019 de 1,6 et 2,4 mm sur les **FIL 7.45** et **FIL 7.30** respectivement (Figure 25). Pour les deux extensomètres, les évolutions sont lentes de l'ordre de 2 mm de début 2019 à mi-2023. Deux épisodes d'accélération restreinte de courte durée sont enregistrés uniquement par le **FIL 7.30** en novembre 2021 et en avril 2023 impliquant chacun des déplacements inférieurs à 0,5 mm. À partir du 21 octobre 2023, des déplacements plus rapides sont enregistrés par les deux extensomètres jusqu'à la fin de l'année. Ils correspondent à des vitesses de l'ordre de 0,5 mm/mois. Jusqu'en

2022, les deux dispositifs d'extensométrie en zone Hélène n'étaient pas stabilisés, la mise en tension de leurs câbles étaient supposée incomplète. Pour favoriser ce processus, des contrepoids supplémentaires ont été progressivement mis en place. Le changement d'évolution en 2023, synchrone pour les deux FIL et conduisant à des vitesses comparables à celles observées par les FIL des autres zones, fait suite au dernier ajout, suggérant que ces lestages ont été efficaces. **Pour l'année 2023, les vitesses moyennes des FIL 7.45 et FIL 7.30 sont respectivement de 0,10 et 0,15 mm/mois.**

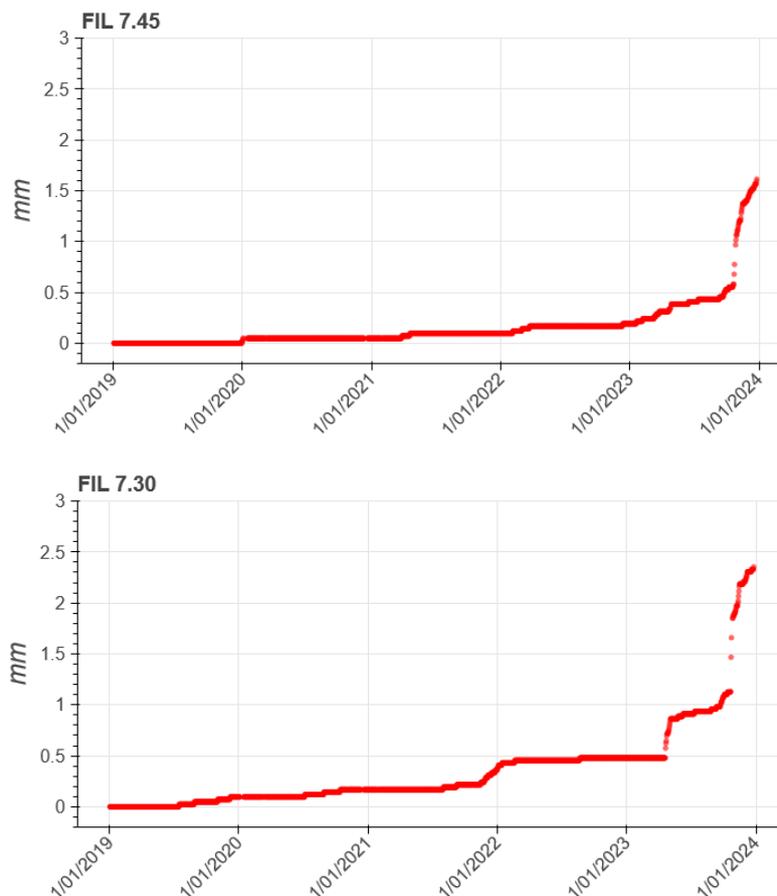


Figure 25 : Déplacements mesurés de janvier 2019 à décembre 2023 par les câbles implantés en zone Hélène dans les forages inclinés de TELSITE, en haut, à 45° et, en bas, à 30°.

En zone Française, le **FIL 10.45** ayant subi une panne de mi-février 2020 à mi-juillet 2020, le déplacement cumulé depuis 2019 ne peut pas être estimé (Figure 26). Les données disponibles indiquent qu'il est au minimum de 2,9 mm. Ces mesures montrent par ailleurs, de début 2019 à début 2023, une évolution faible, plus particulièrement à partir de mi-juillet 2020. L'année 2023 est marquée par une accélération fin février qui a duré un mois et demi environ et a conduit à un déplacement de 2 mm, soit une vitesse de l'ordre de 1,3 mm/mois. L'évolution redevient ensuite à nouveau très faible. **La vitesse moyenne du FIL 10.45 calculée sur toute l'année 2023 est de 0,16 mm/mois.**

Le déplacement cumulé ne peut pas être mesuré sur toute la période de mesures pour le FIL 10.30, une panne engendrant une lacune d'environ deux mois dans les données au tout début de 2019. Depuis la reprise des enregistrements, il est très faible, de 1,4 mm. L'évolution du FIL 10.30 est proche de celle du FIL 10.45 jusque

fin novembre 2022 où elle s'individualise avec une accélération à environ 0,4 mm/mois durant moins d'un mois et demi impliquant un déplacement d'environ 0,6 mm. L'évolution est ensuite à nouveau très faible tout au long de l'année 2023. **La vitesse moyenne du FIL 10.30 calculée sur toute l'année 2023 est inférieure à 0,01 mm/mois.**

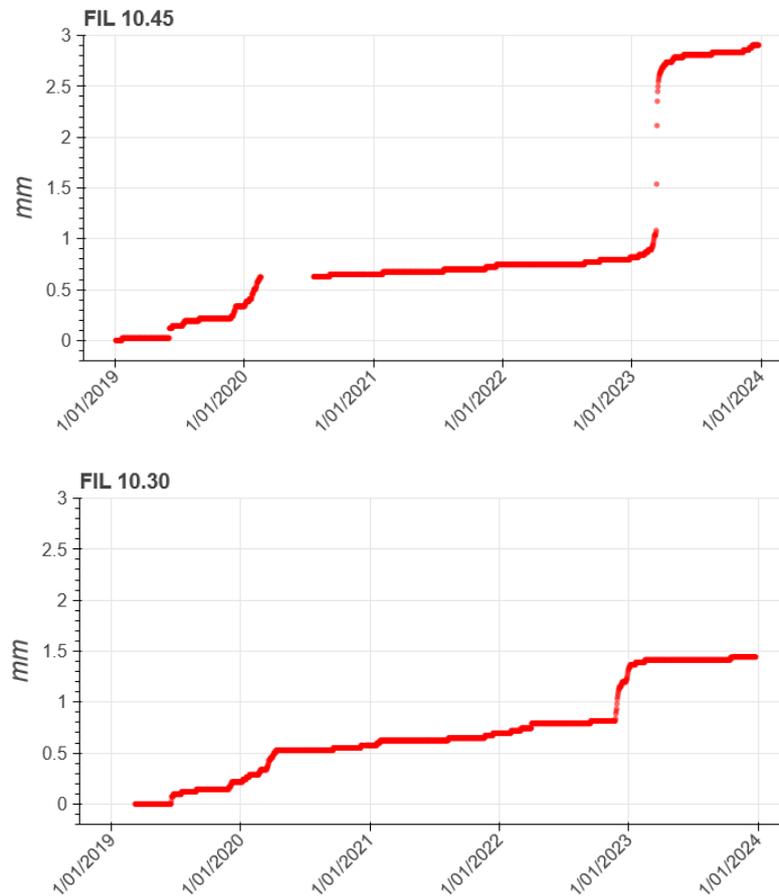


Figure 26 : Déplacements mesurés de janvier 2019 à décembre 2023 par les câbles implantés en zone Française dans les forages inclinés de TELSITE, en haut, à 45° et, en bas, à 30°.

3.4.5. Synthèse des mesures dans les FIL

Dans les trois zones équipées de FIL, depuis 2019, les mesures extensométriques ne montrent pas de mouvements importants des terrains où leurs câbles sont ancrés. Au vu des données disponibles depuis 2019, les déplacements cumulés sont très faibles. De légers déplacements sont détectés à plus court terme par les six capteurs, à des périodes différentes, mais elles ne durent que quelques jours en général et les vitesses « instantanées » n'excèdent pas quelques mm/mois. **Les vitesses moyennes estimées pour l'année 2023 sont au maximum de 0,16 mm/mois.**

Ainsi, au vu des données disponibles depuis 2019, les vitesses des FIL des trois zones instrumentées restent très inférieures aux 20 mm/mois associés au passage au niveau 1 de l'indicateur caractérisant le risque d'éboulement de grande ampleur.

Les très lentes évolutions au cours des cinq dernières années 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 jusqu'en 2018 par les FIL du dispositif de surveillance précédent.

Jusqu'en 2022, les deux dispositifs en zone Hélène n'étaient pas stabilisés, la mise en tension de leurs câbles était supposée incomplète. Des lestages progressifs ont été mis en œuvre pour favoriser ce processus, les données de 2023 suggèrent qu'ils ont été efficaces. Les mesures des prochaines années permettront de le confirmer.

3.5. Mouvements mesurés en profondeur par inclinométrie

En zone Hélène, les déformations en profondeur sont mesurées par une chaîne d'inclinomètres située dans un forage vertical (Tableau 3).

Les données d'inclinométrie sont examinées sur différentes échelles de temps. Tout d'abord, les mesures des inclinomètres « équivalents » présents dans le dispositif de surveillance actuel et le précédent sont comparées au premier ordre afin d'obtenir une image globale de l'évolution des mouvements sur une période de vingt-sept ans (§3.3.3). Ensuite, l'ensemble des mesures d'inclinométrie acquises depuis le 1er janvier 2019 par le dispositif actuel est présenté pour visualiser les mouvements récents, plus particulièrement ceux de 2023, et leurs vitesses moyennes (§3.3.4).

3.5.1. Dispositif de mesures inclinométriques

La chaîne inclinométrique du système TELSITE en zone Hélène est constituée de dix caissons répartis sur toute la hauteur du forage, 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". Le premier modèle moins précis que le second mais disposant d'une amplitude de mesure plus grande est prévu pour mesurer les fortes variations d'inclinaison contrairement au second. La nomenclature des capteurs, leur profondeur et les faciès géologiques correspondants sont reportés dans le Tableau 6 ci-après.

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		
HELF_Lily	323 m	Calcaires crayeux et dolomies
HELF_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 6 : Caractéristiques des inclinomètres du système TELSITE implantés dans le forage vertical en zone Hélène.

3.5.2. Estimation des mouvements par inclinométrie

Les mesures inclinométriques permettent de suivre l'évolution temporelle des rotations de chaque capteur dans les directions Est-Ouest et Nord-Sud.

Les vitesses des rotations, indiquées par la suite, pourront être comparées (Tableau 7 et Tableau 2) :

- à la vitesse de 0,46 mdeg/mois¹⁰ représentative d'une situation normale et des mouvements observés en 1997 suite à l'arrêt des expérimentations nucléaires ;
- à celle de 4,6 mdeg/mois correspondant au passage au niveau 1 de l'indicateur caractérisant le risque d'un éboulement de grande ampleur (évènement de type 2).

¹⁰ À partir du présent document, la valeur de 0,46 mdeg/mois est utilisée comme valeur de référence pour caractériser une situation normale. Le §3.5.3 ci-après montre en effet que la valeur de 0,2 mdeg/mois précédemment retenue n'était pas représentative des mouvements mesurés après l'arrêt des expérimentations nucléaires.

À titre indicatif, des inclinaisons de 0,46 et 4,6 mdeg d'un segment rigide long de 50 m (i.e. la distance moyenne séparant deux inclinomètres successifs) correspondent à des mouvements entre ses deux extrémités de l'ordre de 0,4 et 4 mm respectivement.

3.5.3. Évolution des mesures inclinométriques depuis les années 90

La chaîne inclinométrique actuelle est implantée en zone Hélène, alors que celle du dispositif de surveillance 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 à différentes profondeurs, montraient des évolutions distinctes et variables au cours du temps depuis leur mise en place en 1996. À 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'Ouest-Sud-Ouest 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 de faibles perturbations 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.

Les inclinomètres actuels ayant été transférés dans une autre zone, les mesures depuis 2018 du **Lily F** sont mises en regard de celles, de 1997 à 2018, de l'inclinomètre n°26 du système de surveillance précédent, uniquement à titre illustratif (Figure 27). Ces deux capteurs sont implantés dans des calcaires crayeux, à 323 et 376 m de profondeur respectivement :

- De 1997 à fin 2003, la vitesse de rotation enregistrée par l'ancien **capteur n°26** est d'environ 0,46 mdeg/mois, valeur illustrée par les droites tiretées. Cette vitesse, représentative du niveau 0 de l'échelle des risques d'un éboulement de grande ampleur (événement de type 2), est utilisée comme vitesse de référence ;
- Les courbes du **capteur n°26** indiquent ensuite un changement de direction de son mouvement fin 2003 ;
- Sur la période de mesure disponibles, les données du **Lily F** montrent des évolutions relativement stables. Les vitesses mesurées actuellement sont globalement équivalentes ou inférieures à celles de l'ancien capteur n°26.

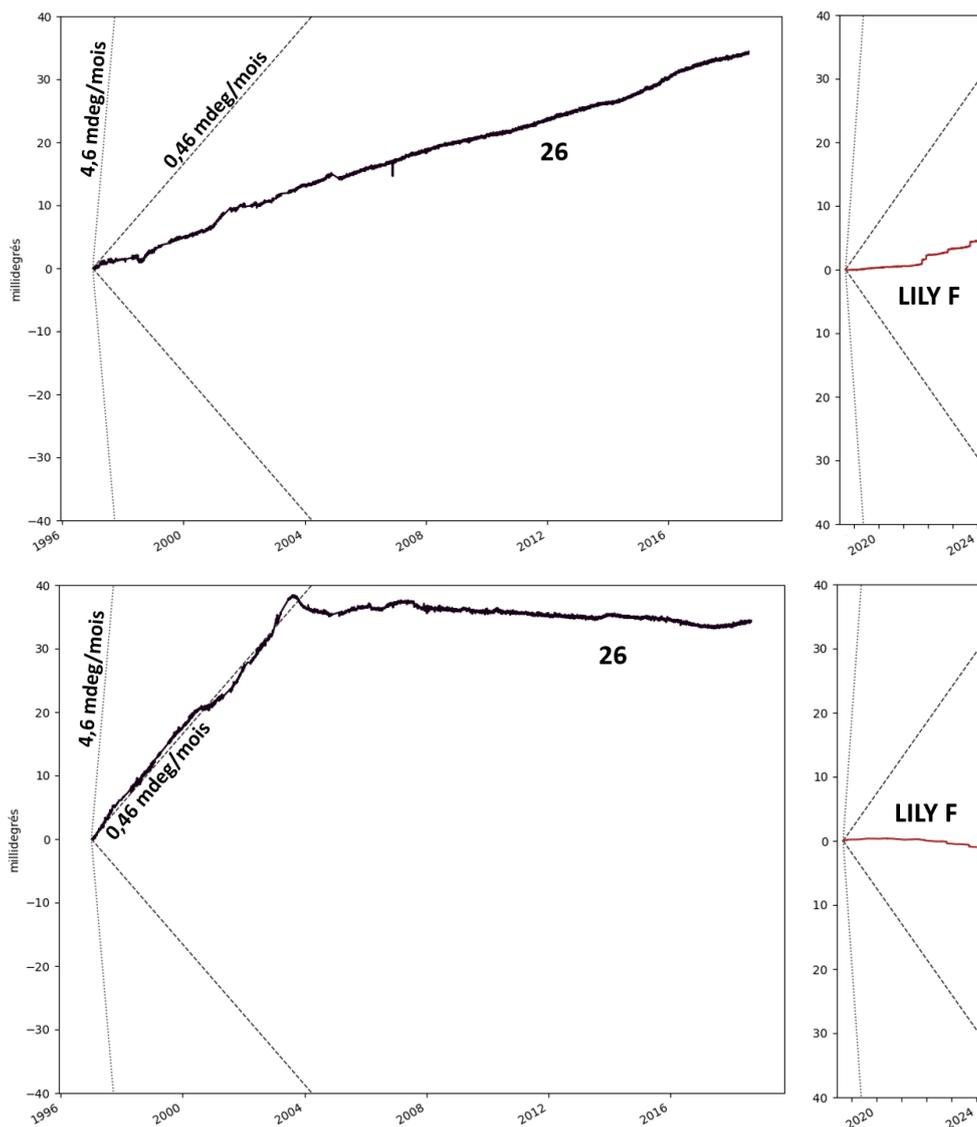


Figure 27 : Données de l'inclinomètre n°26 (à gauche, en noir) du dispositif de surveillance précédent avec les données du LILY F (à droite, en rouge) du dispositif actuel. En haut, sont représentées les composantes Nord-Sud des rotations, en bas leurs composantes Est-Ouest. Les courbes des deux capteurs ne sont pas accolées car les inclinomètres actuels sont situés en zone Hélène, alors que les précédents étaient en zone Camélia. Les droites représentent les vitesses de référence (tiretés et pointillés gris) définies dans le §3.3.2 et dans le Tableau 7.

3.5.4. Déformations en profondeur mesurées par inclinométrie depuis 2019

Les données des inclinomètres opérationnels du système TELSITE actuel sont disponibles depuis 2018, mais pour ne pas surcharger les graphiques présentés dans les bilans annuels, les mesures sont affichées sur les cinq dernières années. Elles montrent, de janvier 2019 à décembre 2023, des évolutions globalement lentes au sein des différentes couches sous-jacentes de la zone Hélène (Figure 28 et Figure 29). En l'absence de variations importantes sur cette période, les enregistrements des capteurs Lily, plus sensibles que les ClinoF, sont plus appropriés pour détecter les mouvements de faible amplitude. Les courbes obtenues pour les inclinomètres Lily J, I, H, G, F, D, B et A sont présentées (certaines voies des Lily C et E ne sont plus exploitables, cf. §6.1) :

- Le capteur **Lily J** (Figure 28), le plus superficiel, est le seul subissant des variations cycliques de période annuelle bien marquées (oscillation des mesures). 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. Depuis 2019, la composante Est-Ouest du **Lily J** est stable et sa composante Nord-Sud montre une tendance globale négative correspondant à une inclinaison d'environ 0,08 mdeg/mois vers le Sud. **Calculées sur l'année 2023, les vitesses moyennes du Lily J sont de 0,05 mdeg/mois vers le Nord et de 0,07 mdeg/mois vers l'Est.** Cette différence entre les mouvements examinés sur différentes fenêtres de temps (moyennes quinquennale et annuelle) illustre l'influence des variations saisonnières : estimées sur une trop courte durée, les vitesses, biaisées par ces oscillations transitoires, ne sont pas représentatives des déformations permanentes. Il peut être noté que les données de ce capteur n'étaient plus reçues depuis le 9/11/23. La multiplicité des capteurs et leur redondance assurant le suivi malgré cela, le dépannage a attendu la mission de maintenance d'avril 2024 pour être effectué.
- Les deux composantes du **Lily I** (Figure 28) montrent des évolutions minimales, légèrement oscillantes, conduisant à de très faibles déformations cumulées (de l'ordre de 1,5 mdeg au maximum sur cinq ans). En 2023, un très faible (environ 0,3 mdeg) et bref mouvement vers le Sud de l'inclinomètre a été détecté le 13 septembre. **Estimé sur l'année 2023, la vitesse moyenne du Lily I est de 0,03 mdeg/mois vers le Nord et de 0,01 mdeg/mois vers l'Ouest.**
- Depuis 2019, le **Lily H** (Figure 28) montre de faibles rotations à moyen terme de l'ordre de 1 mdeg/mois au maximum sur quelques mois à un an. Les mouvements sont globalement vers le Nord-Nord-Est si l'on exclut les discontinuités. Celles-ci sont épisodiquement enregistrées et leurs amplitudes n'excèdent pas quelques mdeg : en 2023, un mouvement de l'inclinomètre essentiellement vers l'Est d'environ 1,5 mdeg a été détecté le même jour que sur le **Lily I**, le 13 septembre. **Calculées sur 2023, les vitesses moyennes du Lily H sont de 0,02 mdeg/mois vers le Nord et de 0,12 mdeg/mois vers l'Est.**
- Depuis 2019, le **Lily G** (Figure 28) enregistre une lente rotation globale, principalement vers le Sud, avec une vitesse moyenne de 0,1 mdeg/mois environ. Sa composante Est-Ouest montre des variations minimales. Alors que des irrégularités étaient enregistrées jusqu'au printemps 2020, l'évolution du Lily G est à présent globalement stable. Comme pour le **Lily H**, des petits mouvements brefs de l'inclinomètre sont enregistrés, notamment un le 13 septembre 2023. Il montre une rotation vers le Sud n'excédant pas 1 mdeg. **Sur l'année 2023, le mouvement moyen du Lily G, cohérent avec la déformation à plus long terme, est de 0,12 mdeg/mois vers le Sud.**
- Le **Lily F** (Figure 29) détecte depuis 2019 des mouvements lents ayant conduit à des rotations cumulées de 4,5 mdeg vers le Nord et de 1 mdeg vers l'Ouest, soit en moyenne sur cinq ans des vitesses d'environ 0,08 et 0,02 mdeg/mois respectivement. Ce capteur a enregistré un petit mouvement bref le 13 septembre 2023. Ses composantes n'excèdent pas 1 mdeg et indiquent une rotation dans la même direction que celle enregistrée depuis 2019. **Calculées sur 2023, les vitesses moyennes du Lily F, de 0,12 mdeg/mois vers le Nord et de 0,05 mdeg vers l'Ouest, sont en accord avec les mouvements à plus long terme.**

- Depuis 2019, le **Lily D** (Figure 29) montre globalement des rotations très lentes vers le Sud et vers l'Ouest. Le petit saut enregistré par ce capteur le 13 septembre 2023 est observé dans la direction opposée. Ses deux composantes sont de l'ordre de 1 mdeg. **Les vitesses moyennes du Lily D calculées sur 2023 sont de 0,07 mdeg/mois vers le Nord et de 0,04 mdeg/mois vers l'est.** Ces rotations ne reflètent pas celles, très lentes, détectées à plus long terme, mais sont dominées par le mouvement bref de l'inclinomètre de septembre.
- Le **Lily B** (Figure 29) enregistre depuis 2019 une inclinaison globale vers le Sud-Sud-Est. Celle-ci a conduit à des rotations cumulées d'environ 4,5 mdeg vers le Sud et 1,1 mdeg vers l'Est, soit des vitesses moyennes sur cinq ans de l'ordre de 0,08 mdeg/mois et 0,02 mdeg/mois respectivement. Sa composante Nord-Sud est la seule à enregistrer de petites oscillations périodiques (d'amplitude de 0,1 mdeg environ), non interprétées. **Sur l'année 2023, les vitesses moyennes du Lily B, cohérentes avec celles à plus long terme, sont de 0,06 mdeg/mois vers le Sud et de 0,02 mdeg/mois vers l'Est.**
- Depuis 2019, le **Lily A** (Figure 29), le plus profond, enregistre des mouvements très lents et réguliers, seule une discontinuité de très faible amplitude est enregistrée le 22 août. La rotation du **Lily A** cumulée sur cinq ans vers l'Est est de l'ordre de 2 mdeg, soit un taux moyen de 0,03 mdeg/mois, tandis que la composante Nord-Sud montre une évolution extrêmement faible. **Calculées sur 2023, les vitesses moyennes du Lily A sont de 0,01 mdeg/mois vers le Nord et de 0,02 mdeg vers l'Est.**

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.

3.5.5. Synthèse des mesures inclinométriques

Cinq capteurs Lily (D, F, G, H et I) ont enregistré le 13 septembre 2023 de petites discontinuités sur leurs courbes qui sont moins visibles sur les données des ClinoF, dont la sensibilité est plus faible que celle des Lily. **L'ensemble des mesures montre que ces discontinuités ont été détectées à des profondeurs comprises entre 100 et 400 m.** En revanche, aucun signal équivalent n'a été enregistré par les Lily et ClinoF les plus superficiels (J), ni par ceux situés dans le volcanisme (A et B). Des mouvements similaires des capteurs sont survenus les années précédentes. Ceux du 13 septembre 2023 sont visibles sur les mesures des capteurs d'une grande partie du massif corallien, mais leurs amplitudes sont toutes très faibles (1,5 mdeg au maximum) et leurs directions diffèrent d'un capteur à l'autre, écartant l'hypothèse d'un mouvement global de masses rocheuses. **Aucun autre indicateur ou évènement concomitant qui permettrait de les interpréter en termes de mouvements réels des masses rocheuses n'a par ailleurs été identifié.**

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. Néanmoins, alors que ces oscillations d'origine sismique sont transitoires, les discontinuités enregistrées le 13 septembre 2023 reflètent quant à elles des mouvements permanents des capteurs.

Mis à part ces mouvements ponctuels qui n'ont pas reçu à ce jour d'interprétation physique, les capteurs Lily opérationnels implantés en zone Hélène montrent en 2023 des évolutions très faibles, de l'ordre du dixième de mdeg/mois au maximum, et globalement comparables aux années antérieures. Seul le capteur le plus superficiel est soumis à des variations saisonnières. **Les mesures des Lily indiquent des mouvements globaux depuis 2019 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. Ainsi, les mesures suggèrent des mouvements différentiels des capteurs minimes et variables dans le temps qui traduisent leur grande sensibilité. **Au vu des très faibles vitesses et de leurs disparités, les résultats actuels de mesure des inclinomètres ne sont pas représentatifs de la déformation des masses rocheuses mais de la réponse de l'ensemble de la chaîne instrumentale à d'éventuels mouvements de terrain ou des réajustements mécaniques de cette chaîne. Aucune déformation géomécanique significative des masses rocheuses en profondeur n'est observée.**

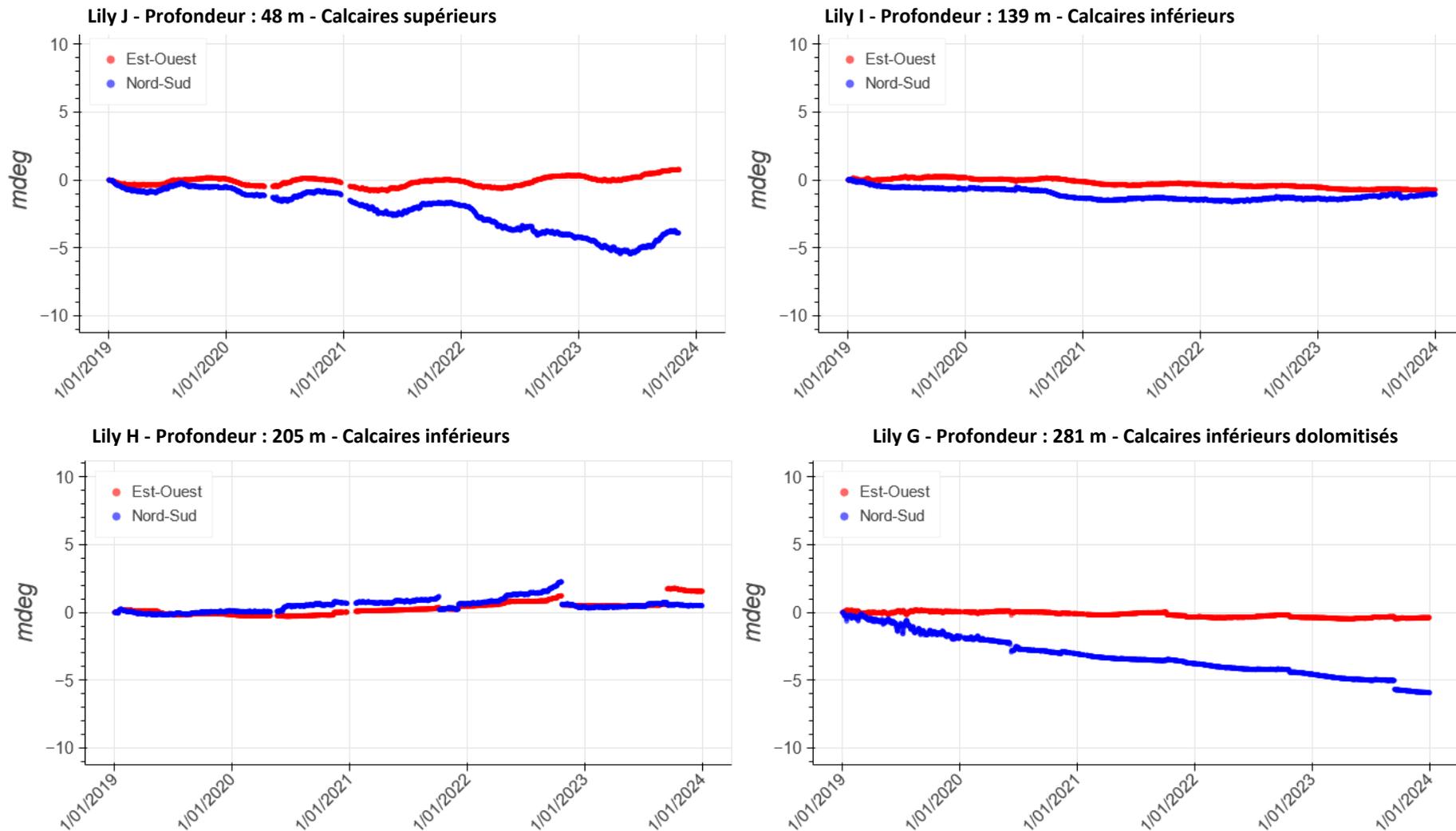


Figure 28 : Mesures de janvier 2019 à décembre 2023 des capteurs inclinométriques J, I, H et G de TELSITE, implantés en forage vertical en zone Hélène. L'échelle des ordonnées est choisie pour mettre en perspective ces évolutions par rapport à des variations de l'ordre de quelques mdeg/an au maximum représentatifs du niveau 0 de risque d'un événement de type 2.

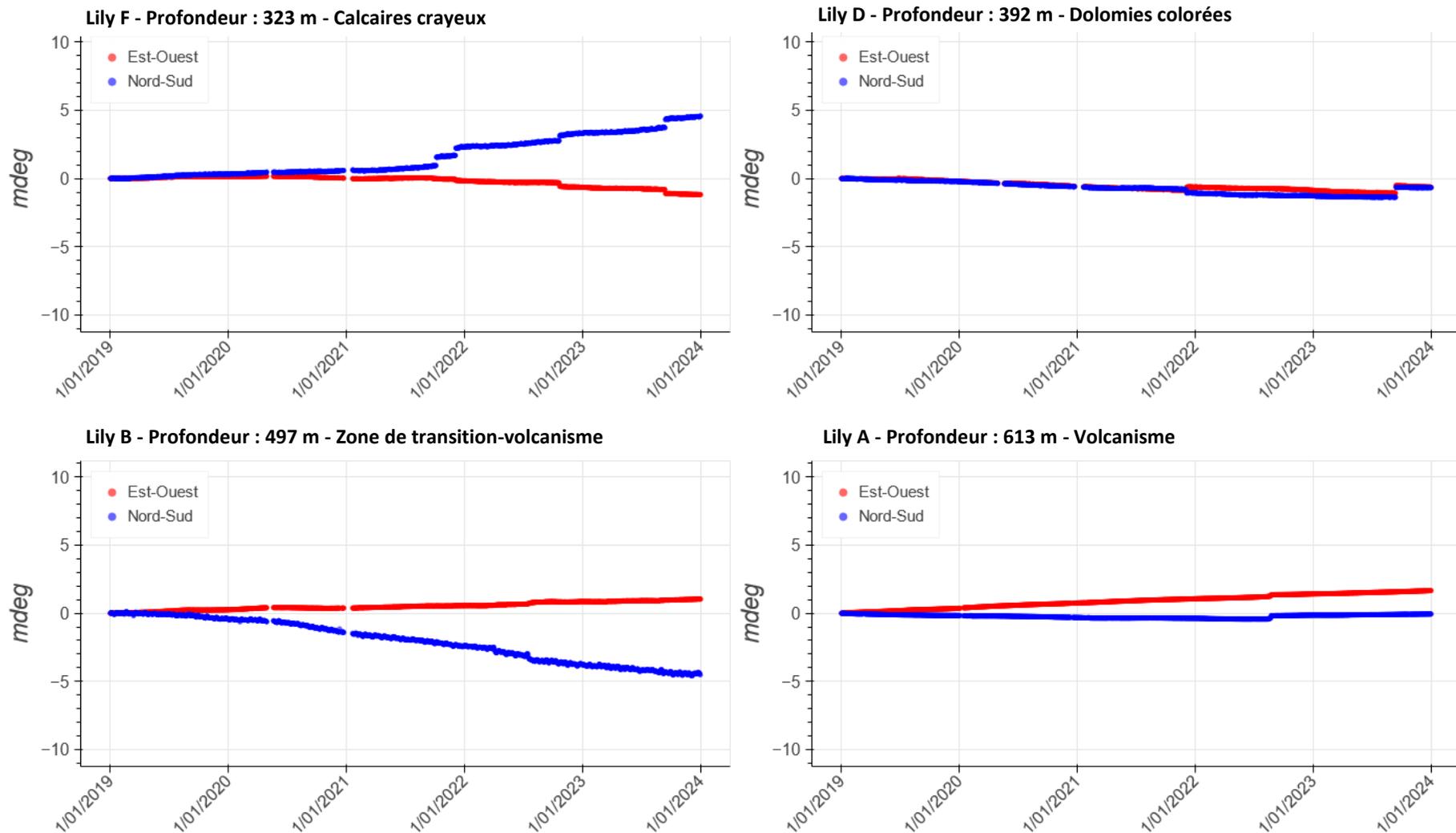


Figure 29 : Mesures de janvier 2019 à décembre 2023 des capteurs inclinométriques F, D, B et A de TELSITE, implantés en forage vertical en zone Hélène. L'échelle des ordonnées permet de mettre en perspective ces évolutions par rapport à des variations de l'ordre de quelques mdeg/an au maximum représentatifs du niveau 0 de risque d'un événement de type 2.

3.6. Analyse globale : comparaison aux vitesses de référence et indicateur VR

En complément de l'étude des données de chaque capteur présentée précédemment, **une analyse plus globale pour la zone Nord-Est est réalisée à l'échelle de l'année 2023** (Tableau 7) : pour chaque indicateur (1^{ère} colonne), le taux retenu pour 2023 (3^{ème} colonne) est la valeur maximale des vitesses moyennes annuelles calculées pour chacun des capteurs. Pour rappel, ces vitesses, indiquées précédemment dans les descriptions des mesures, sont calculées à partir des données de l'année 2023, à l'exception de celles des déplacements horizontaux et verticaux en surface qui sont estimées à partir de quatre années de mesures GPS (§3.3.2).

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 en 1995. Les valeurs au-delà desquelles un changement significatif d'évolution est attendu sont également indiquées (4^{ème} colonne).

Indicateur	Valeur observée à l'arrêt des expérimentations en 1996	Valeur en 2023	Valeur associée à un changement d'évolution significatif (passage au niveau 1**)
Sismicité : fréquence des microséismes	< 1 / semaine	1,04 / semaine	> 10 / semaine
Déplacements horizontaux*	< 2 mm / mois	0,13 mm / mois	> 20 mm / mois
Déplacements dans les forages inclinés	< 2 mm / mois	0,16 mm / mois	> 20 mm / mois
Déplacements verticaux*	< 1 mm / mois	0,07 mm / mois	> 10 mm / mois
Inclinométrie*	< 0,46 mdeg / mois	0,12 mdeg / mois	> 4,6 mdeg / mois

Tableau 7 : Synthèse et comparaison des mesures TELSITE obtenues en zone Nord-Est en 2023.
 *En valeur absolue. **Voir annexe 2.

Ces comparaisons des mouvements sont illustrées sur les figures 29 à 31. Pour chaque type de mesure, la série temporelle pour laquelle la vitesse moyenne maximale est obtenue en 2023 est représentée avec 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 10.45** en zone Française sont comparées sur l'année 2023 aux vitesses de référence correspondantes, soit 2 et 20 mm/mois (Figure 30). La vitesse de 0,16 mm/mois de ce FIL en 2023 résulte principalement du déplacement de l'ordre de 1,8 mm survenu en mars. Elle est cependant très inférieure aux vitesses de référence ;

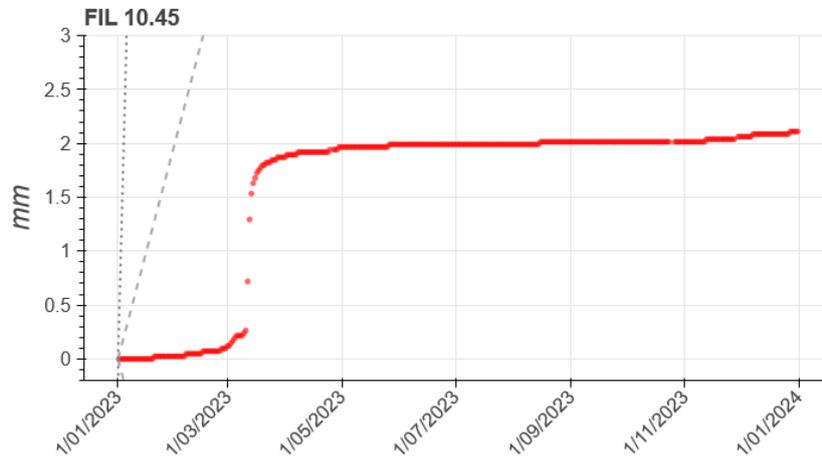


Figure 30 : Déplacements mesurés en 2023 par le câble du FIL à 45° en zone Française comparés à la vitesse mesurée à la fin des expérimentations nucléaires (tireté gris) et à celle associée au passage au niveau 1 de l'échelle des risques d'un événement de type 2 (pointillés gris), 2 et 20 mm/mois respectivement (Tableau 7).

- L'inclinomètre **Lily H**, situé à 205 m de profondeur, montre les variations les plus importantes en 2023. Une vitesse de 0,12 mdeg/mois est obtenue pour sa composante Est-Ouest. Cette valeur, qui résulte principalement d'une rotation de 1,2 mdeg environ survenue en septembre, est inférieure aux vitesses de référence (Figure 31) ;

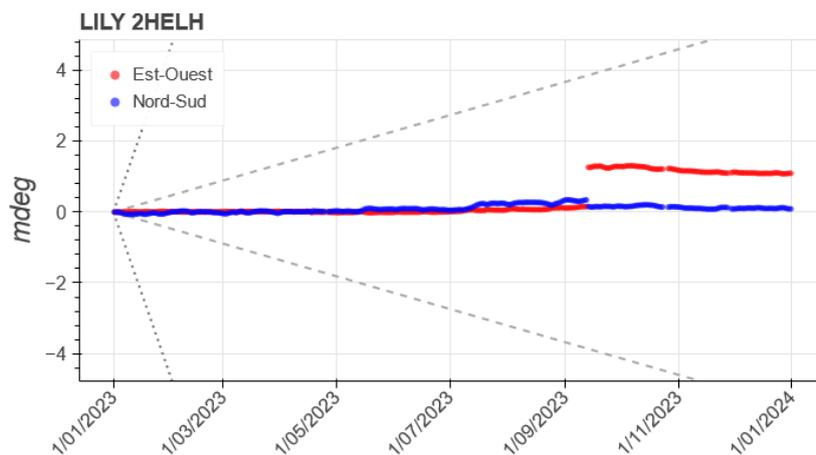


Figure 31 : Mesures en 2023 du capteur inclinométrique Lily H comparées aux vitesses de référence (tireté et pointillés gris) à la vitesse mesurée à la fin des expérimentations nucléaires (tireté gris) et à celle associée au passage au niveau 1 de l'échelle des risques d'un événement de type 2 (pointillés gris), 0,46 et 4,6 mdeg/mois respectivement (Tableau 7).

Comme détaillé précédemment (cf. §3.3.2), 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 évolutions, les quatre dernières années d'enregistrement sont désormais prises en compte pour estimer les vitesses de déformation permanente. Seules les stations dont les mesures n'ont pas été interrompues sur la période 2020-2023 sont considérées. Ainsi :

- Les vitesses horizontales et verticales les plus rapides sont respectivement de 0,13 et -0,07 mm/mois mesurées pour les déplacements des stations **L075** et **T077** par rapport à **J055**.
- Le déplacement horizontal (norme du vecteur défini par les composantes Est-Ouest et Nord-Sud) de **L075** est représenté avec les droites de pente 2 et 20 mm/mois, et la composante verticale de **T077** avec les droites de pente 1 et 10 mm/mois (Figure 32). Dans les deux cas, les tendances globales des courbes sont très inférieures à ces vitesses de référence. 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 de déplacement par rapport à J055 ne peuvent pas être estimées sur la période 2020-2023, en raison de coupures dans leurs enregistrements. Les mesures disponibles pour les trois premières montrent l'absence de déformations permanentes plus rapides que celles identifiées pour **L075** et **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 horizontale et verticale de **C075** estimées sur cette fenêtre, plus courte (près de 3,5 ans) et décalée dans le temps par rapport à la période 2020-2023, sont de l'ordre de 0,1 mm/mois. Il n'est donc pas exclu que la vitesse de **C075** soit actuellement légèrement supérieure à celle de **L075** en horizontal et de **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.

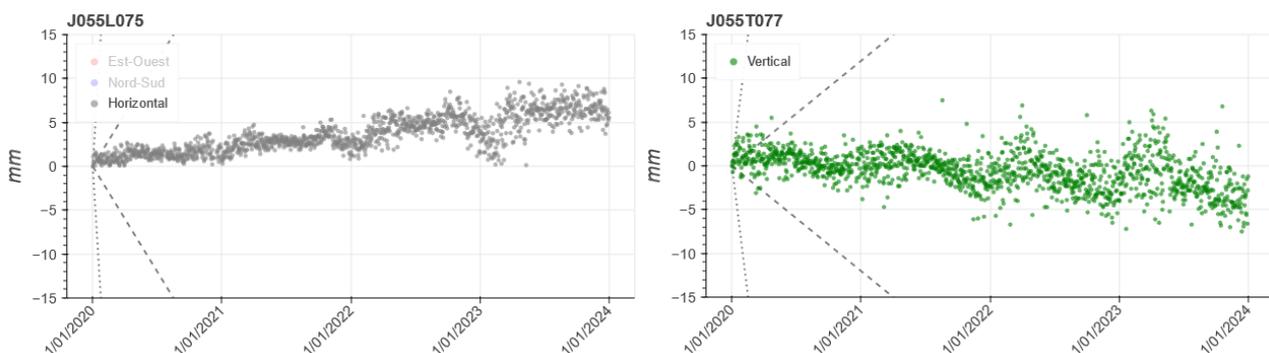


Figure 32 : A gauche, composante horizontale (norme) des déplacements de la station L075 et à droite, composante verticale de ceux de la station T077. Ces déplacements sont représentés de janvier 2020 à décembre 2023 (période utilisée pour le calcul des vitesses) par rapport à la station de référence J055. Les courbes sont comparées à la vitesse mesurée à la fin des expérimentations nucléaires (tiretés gris) et à celle associée au passage au niveau 1 de l'échelle des risques d'un évènement de type 2 (pointillés gris) définies dans le Tableau 7.

Le suivi temporel de la situation géomécanique et du niveau de risque de la zone Nord-Est de Moruroa est présenté en annexe 2. Il s'appuie sur un indicateur global, appelé vitesse relative VR, dont l'évolution est représentée sur la Figure 33.

En 2023, les indicateurs de la déformation observée (issus des mesures de sismicité, données GPS en surface, mesures d'extensométrie et d'inclinométrie en forage) correspondent à une évolution très lente.

Au vu de l'ensemble de ces observations, l'activité géomécanique actuelle de la zone Nord-Est de l'atoll de Moruroa peut être classée au niveau zéro de l'échelle des risques (Tableau 2), correspondant à une situation normale.

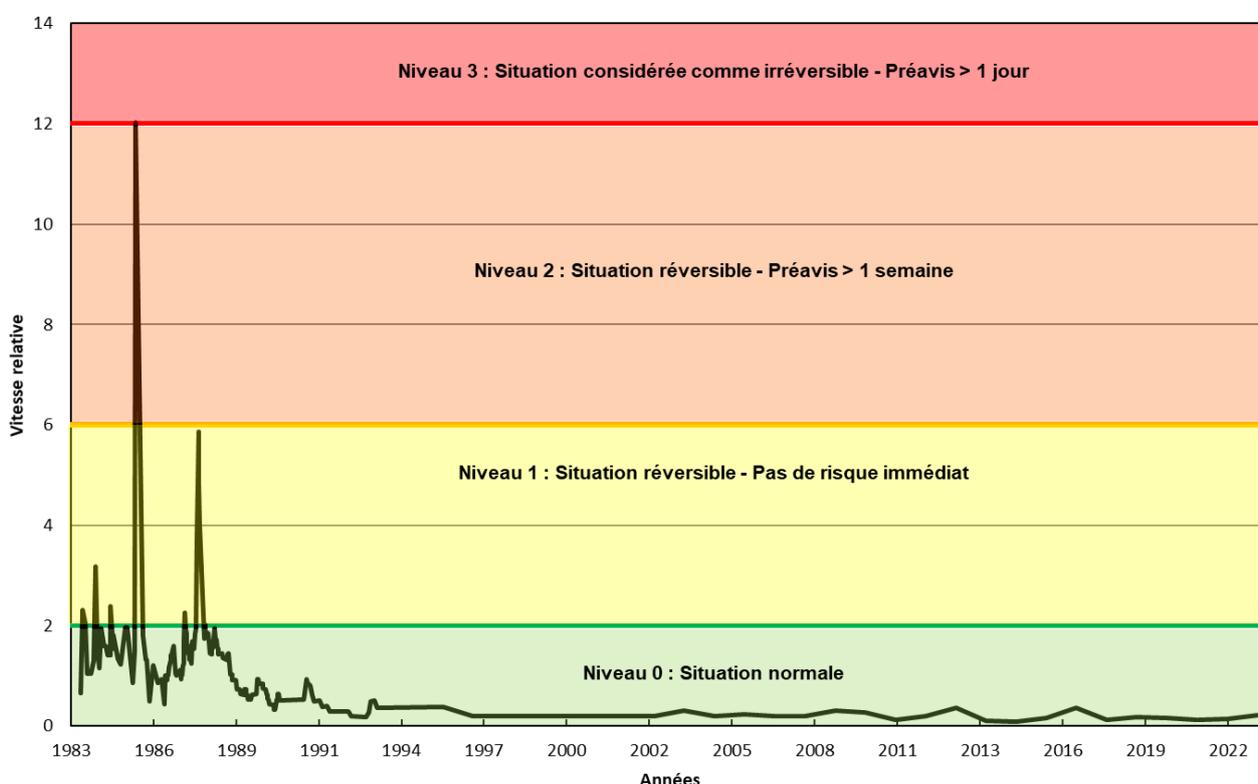


Figure 33 : Évolution au cours du temps de la vitesse relative VR (courbe noire), indicateur global de la situation géomécanique à Moruroa. Les niveaux de risque du tableau 1 et les délais de préavis vis-à-vis d'un évènement de grande ampleur sont reportés.

4. Bilan de l'évolution dans le secteur Sud-Est de Moruroa (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 évolution, dont les conséquences avaient été prises en compte, n'altère toutefois pas les capacités du système à détecter tous les événements significatifs (de magnitude $M_L \geq 1,0$). Ses performances globales répondent aux objectifs de la surveillance.

En 2023, un seul relâchement de contraintes a été enregistré dans la partie interne de l'atoll (Figure 34). La détection de ce microséisme de très faible magnitude (Figure 35) montre la capacité de la station de surface à détecter de petits événements lorsque le bruit de fond sismique est faible (par temps calme).

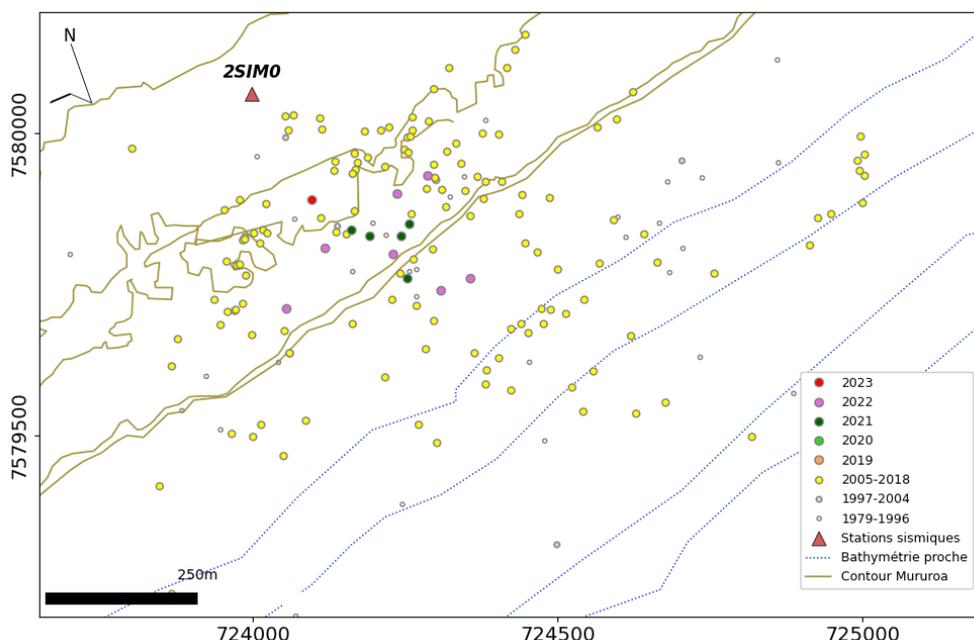


Figure 34 : Carte des événements microsismiques localisés de 1980 à 2023 en zone Sud-Est (données avant décembre 2005 non exhaustives). Le triangle rouge représente la station sismique de surface (2SIMO). Les contours bruns délimitent l'estran.

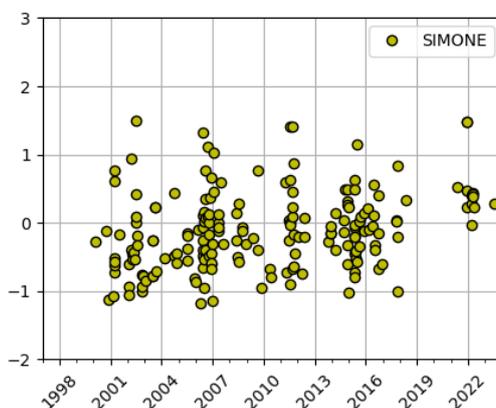


Figure 35 : Distribution temporelle des magnitudes M_L pour le secteur Sud-Est en zone Simone.

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. La prochaine mission de mesures topographiques se tiendra entre 2028 et 2031.

L'ensemble des travaux sollicités dans le cadre de la prestation 2021 ont été réalisés. Ils 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 36) et verticaux (Figure 37) 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 36). 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 36, en haut). Elles atteignaient 4 mm/an entre 2007 et 2014 (Figure 36, 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 36, en haut). Les vitesses maximales étaient de 6-7 mm/an entre 2007 et 2014 (Figure 36, en bas).
- Après leur ralentissement global depuis 1996 (Figure 37), les mouvements de subsidence sont faibles. Leurs vitesses maximales, mesurées en zone Camélia, sont à présent de 2 mm/an sur la route en zone interne (Figure 37) 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 perdure, sa vitesse actuelle n'excède pas 1 mm/an.

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

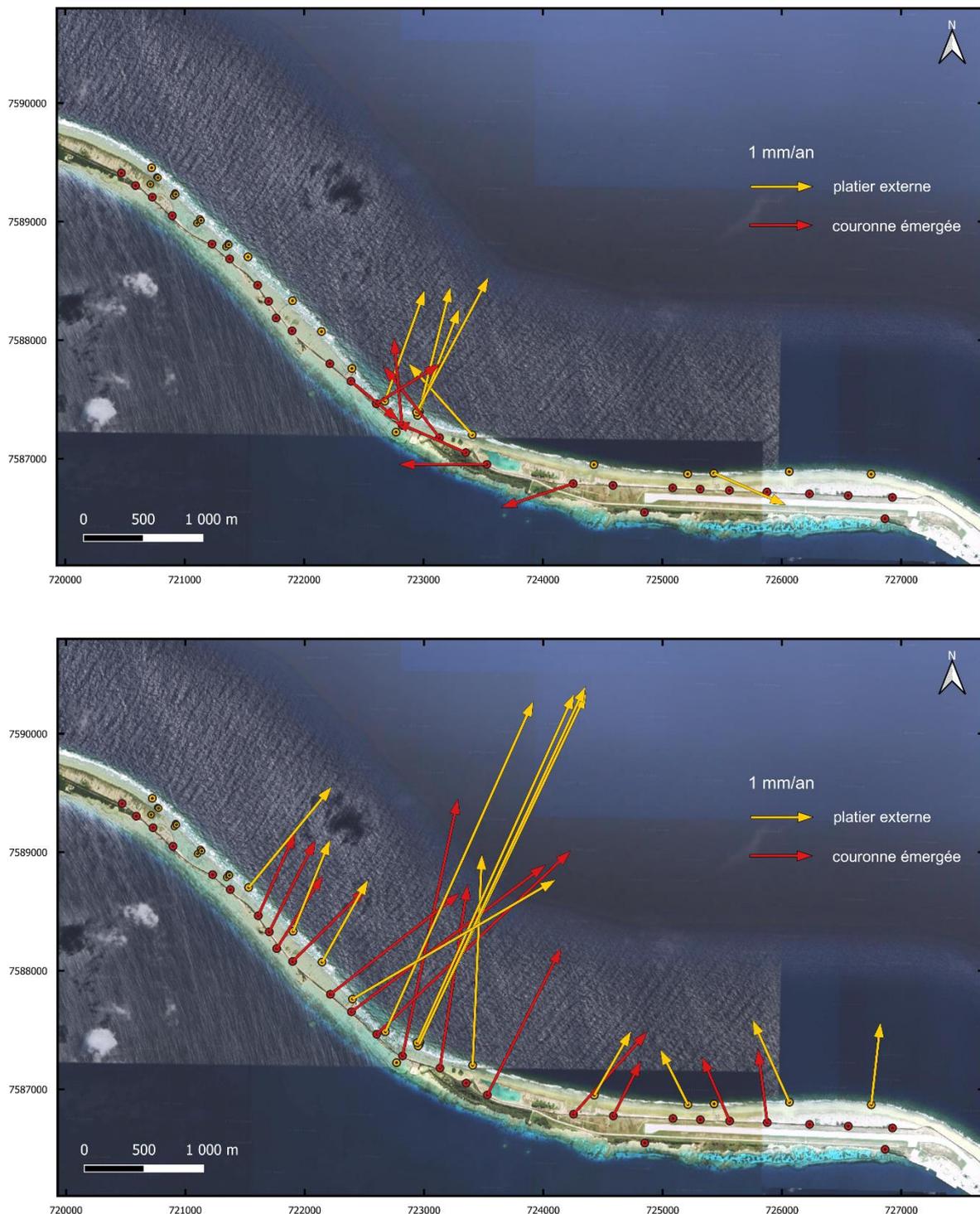


Figure 36 : Positions des piliers relevés par topographie et vitesses de leurs déplacements, en rouge sur la couronne émergée et en jaune sur le platier externe (fond de carte Google Maps). En haut, sont présentées les vitesses mesurées entre 2014 et 2021 et, en bas, entre 2007 et 2014. Seules les vitesses supérieures à 1 mm/an sont représentées. Il est à noter que les vitesses de l'ordre de 1 mm/an sont proches de l'incertitude de mesure et doivent être interprétées avec prudence.

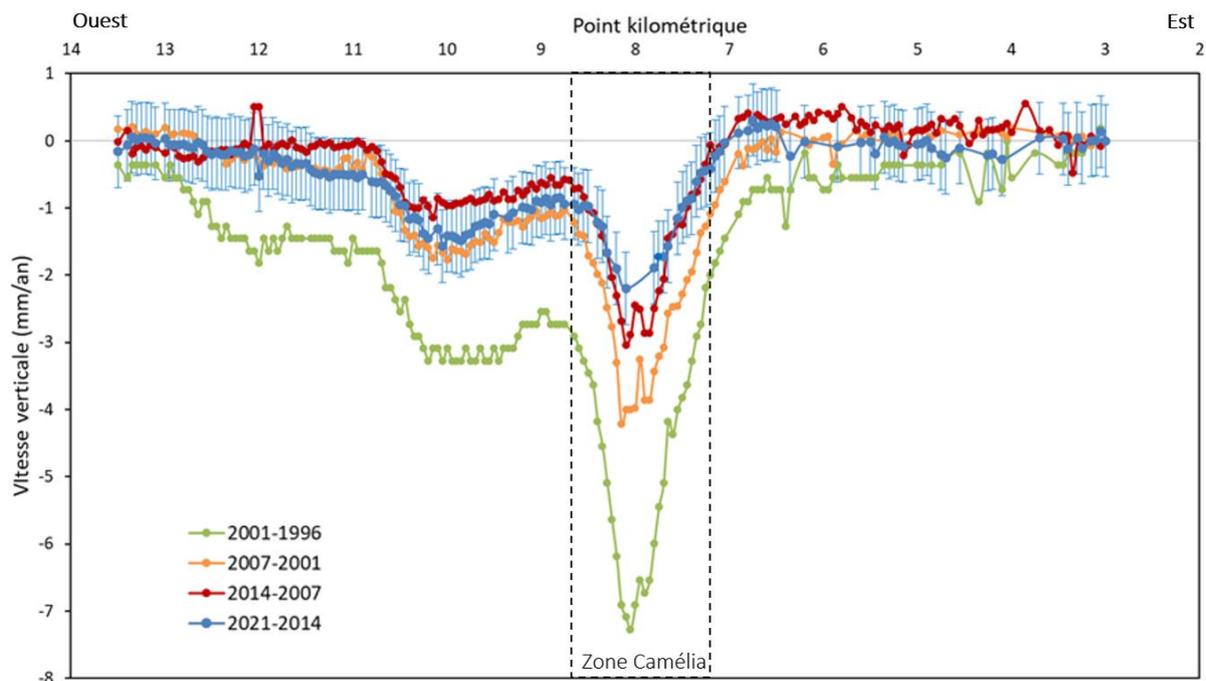


Figure 37 : Vitesses de déplacement vertical déduites des mesures de nivellement le long de la route Nord de Moruroa, en bleu entre 2014 et 2021, en rouge entre 2007 et 2014, en orange entre 2001 et 2007, et en vert entre 1996 et 2001. Les barres d'erreur sont évaluées pour la période 2014-2021 à $\pm 0,5$ mm/an. Les tiretés 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 issus de la campagne topographique 2021 sont compatibles avec ceux des mesures du système continu TELSITE. Pris ensemble, ils permettent de proposer l'interprétation globale suivante :

- Les secteurs Françoise, Camélia et Irène présentent des mouvements lents en profondeur.
- Dans le secteur Françoise, le mouvement en profondeur, qui était le plus notable par le passé, est à présent devenu analogue à celui des autres secteurs cités.
- En surface, c'est dans le secteur Camélia que les mouvements, bien qu'en ralentissement, restent les plus notables et touchent la partie émergée. Le mécanisme global en profondeur interagit avec des mouvements plus superficiels de blocs rocheux.
- Dans le secteur 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 2023

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 pour l'année 2023 sont les suivants :

- 92,9 % pour les capteurs sismiques impliqués dans l'alerte « à 90 secondes ». Ce résultat est principalement dû à des pannes des capteurs en zone Simone (du 01/02/23 au 12/04/23 et du 27/04/23 au 16/06/23) qui ont nécessité des interventions sur site. Ce taux ne reflète pas la capacité à détecter un évènement de type 1 et à déclencher en conséquence l'alerte « à 90 secondes » ; en effet, du fait de la redondance des capteurs, ces dysfonctionnements n'ont pas pénalisé la mission d'alerte « à 90 secondes », ni le suivi de l'évolution géomécanique de la zone Nord-Est.
- 99,9 % pour les capteurs sismiques complémentaires.
- 91,3 % pour les capteurs GPS. Ce taux reflète principalement :
 - l'arrêt de la station H049 entre fin juillet et fin octobre ; le radôme, arraché par une tempête, a été remplacé le 24/10/23 lors de la mission de maintenance ;
 - une panne de la station K107 à partir de fin mai, le radôme a été remplacé le 19/10/23 lors de la mission de maintenance, mais les données sont à nouveau coupées depuis mi-novembre.

Pendant environ un mois et demi, le niveau de fiabilité des données, incomplètes, de la station E071, a été dégradé. Ces mesures ont par conséquent été écartées de l'analyse des déplacements en surface (§3.3.4). En revanche, la station étant restée opérationnelle et des mesures quotidiennes étant disponibles, ce dysfonctionnement n'impacte pas le taux de disponibilité des données.

- 99,9 % pour les extensomètres.
- 94,2 % pour les inclinomètres en forage. En omettant les voies Est-Ouest du Lily C et Nord-Sud du Lily E pour lesquelles les signaux ne sont plus exploitables¹¹ depuis fin 2018, le taux de disponibilité est de 99,0 %. Celui-ci résulte d'une interruption de la réception des données du Lily J depuis le 9/11/23.
- 79,9 % pour les marégraphes. Ce taux résulte principalement des coupures des données marégraphiques en Hélène du 7/11/22 au 12/04/23, en Irène du 5/12/22 au 12/04/23, en Anémone du 17/12/22 au 13/04/23, et en Dindon du 21/04/23 au 19/10/23. Ces coupures sont liées à des dysfonctionnements du numériseur ou à l'endommagement des capteurs. Les données en Denise ne sont par ailleurs plus reçues depuis le 14/12/23. Non essentiels à la surveillance et non nécessaires à l'alerte, les dépannages des marégraphes ne font pas l'objet d'une intervention spécifique, mais sont réalisés lors des missions de maintenance régulières.

¹¹ 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 lors de la conception de la rénovation 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 2023, des pannes intermittentes ont affecté certaines centrales solaires au cours de deux périodes, du 7 au 19 septembre et du 26 septembre au 11 octobre, pendant lesquelles le détachement de Moruroa a été cantonné en zone vie.

Leurs durées sont liées aux délais requis pour mettre en place les missions spécifiques de dépannage sur site. Ces dysfonctionnements, favorisés par de mauvaises conditions météorologiques, ont entraîné des coupures très ponctuelles et n'ont pas empêché la récupération ultérieure des données. Ces pannes n'ont par conséquent pas de répercussion significative sur les taux de disponibilité des mesures présentés ci-dessus (§6.1). Il est à noter que le remplacement des équipements d'alimentation, initialement planifié en avril 2023, avait été reporté en octobre en raison d'un retard de livraison en Polynésie française. Ces interventions sont indiquées ci-après parmi les actions de maintenance.

En 2023, des actions de maintenance curative et préventive ont été menées au cours de deux missions dédiées du 10 au 19 avril et du 17 au 24 octobre.

Les principales actions de maintenance curative sont les suivantes :

- Remplacement des antennes GPS des stations K107 (18/10/23), H049 (18/10/23) et C075 (18/10/23).
- Remplacement des capteurs de submersion en zones Anémone (13/04/23), Viviane (19/10/23) et Dindon (21/10/23).
- Reprise du centrage de capteurs sismiques en zones Gisèle (13/04/23) et Denise (22/10/23).
- Mise en place sur les deux extensomètres en Hélène d'une charge supplémentaire de 20 kg (17/04/23), sollicitations par délestage et relestage en vue d'accélérer leur mise en tension et ajout d'une charge supplémentaire de 30 kg (20 et 21/10/23).
- Remplacement, sur les chaînes d'acquisition, de composants électroniques au sein de numériseurs, du numériseur en Simone (13/04/23 et 16/06/23), et d'une antenne GPS au cours des deux missions.
- Remplacement de convertisseurs dans les coffrets d'éclairage d'abris et d'un panneau solaire en zone Dindon (10 au 19/04/23), remplacement d'une protection contre la foudre en zone Dindon (21/04/23).
- Remplacement du capteur d'intrusion de l'abri en Gisèle, nettoyage et traitement anti-rongeurs de l'abri Echo (15/04/23), remplacement de câbles coaxiaux des digues KILO (18/10/23) et CHARLIE (20 et 21/10/23).

Les principales actions de maintenance préventive sont les suivantes :

- Sauvegarde de l'ensemble des données instrumentales (21/10/23).
- Tests annuels des capteurs de secours et relevé des pressions dans les caissons des forages Hélène, Françoise et Irène (11 et 17/04/23).
- Tests de suivi des extensomètres en Irène, Hélène et Françoise (12/04/23 et 22/10/23).
- Mise à jour et test des récepteurs GPS de secours (15 et 18/04/23).
- Remplacement préventif du marégraphe de la digue HOTEL (21/10/23).
- Remplacement du coffret du marégraphe Kilo (13/04/23).
- Contrôle de l'ensemble des centrales solaires et des systèmes de distribution associés (10 au 19/04/23).

- Remplacement des 48 batteries des abris Jeanne, Echo, Simone, Viviane, Edith, Kilo, Gisèle et Camélia (17 au 24/10/23).
- Reprises en bout de digues KILO et CHARLIE des fixations des câbles coaxiaux des stations GPS K107 et C075 (13 et 14/04/23).
- Surélévation des supports de batterie et du capteur sismique en Simone (14 au 17/04/23).
- Nettoyage et traitement anti-rongeurs dans les abris (11 au 17/04/23).

Outre les deux missions annuelles programmées, trois interventions supplémentaires de dépannage ont été jugées nécessaires pour le remplacement :

- du coffret de numérisation de la station Simone (15/06/23) ;
- d'équipements d'alimentation dans les secteurs de KILO et ECHO touchés par des dysfonctionnements intermittents depuis le 7 septembre (16 et 17/09/23) ;
- d'équipements d'alimentation en zone Viviane et dans le secteur d'ECHO touchés par des dysfonctionnements intermittents depuis le 26 septembre (10/10/23).

6.3. Bilan du fonctionnement de TELSITE pour l'année 2023

L'alerte « à 90 secondes » a été opérationnelle tout au long de l'année 2023 à l'exception des périodes du 7 au 19 septembre et du 26 septembre au 11 octobre, soit 92,6% de l'année. Pendant ces périodes le détachement de Moruroa a été cantonné en zone vie à titre préventif. La sécurité du personnel a ainsi été assurée durant l'intégralité de l'année 2023.

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, en dehors des deux périodes de panne, et de l'évolution géomécanique de manière régulière tout au long de l'année.

7. Conclusion générale pour l'année 2023

Le système de télésurveillance TELSITE de l'atoll de Moruroa a permis d'assurer un suivi continu de l'atoll sur toute l'année 2023.

Les objectifs de la surveillance ont été remplis en termes de suivi du niveau de risque lié au déclenchement d'un glissement de loupe correspondant à l'événement de type 2 qui pourrait impacter Tureia et Vanavana.

Par ailleurs, la prévention du risque lié à l'occurrence d'un événement de type 1, qui n'impacte que Moruroa, a été assurée toute l'année en recourant notamment à deux périodes de cantonnement du personnel en zone vie.

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 qui se poursuit dans les zones Nord-Est et Sud-Est de Moruroa.

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 néanmoins de suivre 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.
COMSUP	Commandement Supérieur en Polynésie française : commandement à la tête des formations militaires stationnées en Polynésie française.
DGA	Direction Générale de l'Armement.
DSCEN	Département de Suivi des Centres d'Expérimentations Nucléaires.
FIL	Forage Incliné Latéral.
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.
IGC	International Geomechanical Commission : commission internationale, présidée par le Professeur Fairhurst, ayant mené une évaluation de l'impact des expérimentations nucléaires en Polynésie française dont les résultats ont été publiés en 1999 (<i>Underground nuclear testing in french Polynesia – Stability and Hydrology Issues</i> . 784 pp)
PCS	Plan communal de sauvegarde : document, élaboré sous la responsabilité de la mairie, visant à organiser les moyens communaux existants pour faire face aux situations d'urgence.
PK	Point Kilométrique défini sur la route qui distribue les installations de Moruroa (vers le Sud ou le Nord) et compté à partir de l'extrémité Est de l'atoll.
TELSITE	Système de TELésurveillance du SITE de Moruroa.
VR	Vitesse Relative : indicateur d'évolution géomécanique de l'atoll de Moruroa.

9. Annexes

9.1. 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. §3.2.3). 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 manuelles 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.*, 82(20), 1977.

Thatcher. W., Hanks, T.C., Source Parameters of Southern California Earthquakes, *J. Geophys. Res.*, 78(35), 1973.

9.2. 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 par mois ;
- les déplacements verticaux en mm par 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 type 2 de grande ampleur (Tableau 8).

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 9 : 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.