

MINISTÈRE DES ARMÉES

DIRECTION DES OPÉRATIONS

DIRECTION GÉNÉRALE
DE L'ARMEMENT

UNITÉ DE MANAGEMENT NUCLÉAIRE
BIOLOGIQUE ET CHIMIQUE

DÉPARTEMENT DE SUIVI
DES CENTRES D'EXPÉRIMENTATIONS NUCLÉAIRES

SURVEILLANCE DES ATOLLS DE MORUROA ET DE FANGATAUFA



TOME II
BILAN GEOMECANIQUE
Année 2020

N°182 DGA/DO/UM NBC/SCEN du 06 septembre 2021
CEA/DIF/DASE/LDG/62/2021/DO du 08 juin 2021



**SURVEILLANCE DES ATOLLS
DE MORUROA ET DE FANGATAUFA**

TOME II

BILAN GEOMECANIQUE

ANNEE 2020

ENV 1CPSI RBE BIL 21000058 B

Date d'émission : 13/04/2021 **Nombre de pages : 57**

Le Chef du S.L.D.G.

Le Chef du D.A.S.E.

Résumé

Ce rapport présente le bilan pour l'année 2020 de l'évolution géomécanique des atolls de Moruroa et de Fangataufa, anciens sites d'expérimentations du Pacifique. Ce bilan est réalisé à partir des données continues acquises en temps réel par le système de télésurveillance TELSITE. Les résultats, dans la continuité de ceux de l'an passé, indiquent un mouvement faible en ralentissement. Ce document rappelle également succinctement les résultats de la dernière campagne topographique spécifique qui a eu lieu en 2014.

Sommaire

1. RESUME.....	6
2. LA SURVEILLANCE GEOMECANIQUE DE L'ATOLL DE MORUROA.....	6
2.1. SUIVI CONTINU DE L'EVOLUTION DE MORUROA.....	7
2.2. COMPOSANTES DU SYSTEME DE TELESURVEILLANCE TELSITE	9
2.3. CAMPAGNES COMPLEMENTAIRES DE CARACTERISATION DE L'EVOLUTION DES ATOLLS	13
3. BILAN DE L'EVOLUTION DE LA ZONE NORD-EST MESUREE EN 2020	13
3.1. SISMICITE	13
3.2. DEPLACEMENTS ET DEFORMATIONS EN SURFACE.....	27
3.3. DEPLACEMENTS ET DEFORMATIONS EN PROFONDEUR	35
3.4. SYNTHESE DE L'ACTIVITE EN ZONE NORD-EST	46
4. BILAN DE L'EVOLUTION DANS LE SECTEUR SUD-EST (ZONE SIMONE).....	48
5. CAMPAGNE TOPOGRAPHIQUE 2014 : PRINCIPAUX RESULTATS.....	49
5.1. PRINCIPAUX RESULTATS POUR MORUROA	50
5.2. PRINCIPAUX RESULTATS POUR FANGATAUFA	50
5.3. INTERPRETATION POUR LA ZONE NORD-EST DE MORUROA.....	50
6. FONCTIONNEMENT DU SYSTEME TELSITE EN 2020.....	51
6.1. DISPONIBILITES DES MESURES	51
6.2. FAITS MARQUANTS ET ACTIONS DE MAINTENANCE	52
6.3. BILAN DU FONCTIONNEMENT DE TELSITE POUR L'ANNEE 2020	53
7. CONCLUSION GENERALE.....	53
ANNEXE 1 – ANALYSE DE LA SISMICITE EN TERMES D'ENERGIE.....	54
ANNEXE 2 – HISTORIQUE DE LA MICROSISMICITE DE 1980 A 2018 EN ZONE SIMONE	55
ANNEXE 3 – DETECTION D'UN EBOULEMENT LE 17 AVRIL 2020 AU NORD DE MORUROA	56

1. Résumé

Dans le cadre de la surveillance des atolls de Moruroa et Fangataufa, le suivi de l'évolution géomécanique a été confié par le ministère des Armées au CEA/DAM. Il repose sur le système automatique de télésurveillance TELSITE (TELésurveillance de SITE) qui a été entièrement rénové durant les années 2016 à 2018. Ce rapport décrit le dispositif actuel, opérationnel depuis fin août 2018, et présente le bilan de l'évolution géomécanique et du fonctionnement du système de surveillance pour l'année 2020.

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 2020. Il s'appuie sur les données des stations sismiques pour analyser l'activité microsismique, des capteurs GPS pour mesurer les déplacements en surface, des extensomètres et des inclinomètres implantés en puits pour détecter les mouvements en profondeur. La microsismicité est également examinée pour la zone Sud-Est de Moruroa. En complément des données de 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 dernière campagne menée en 2014 sont rappelés. Enfin, une dernière partie propose le bilan du système de surveillance TELSITE en termes de fonctionnement et de maintenance.

En 2020, l'activité microsismique de la zone Nord-Est de Moruroa reste très faible, tant en termes de nombre d'évènements que de magnitudes, dans la continuité des années précédentes. La répartition de cette microsismicité au sein de la zone Nord-Est ne traduit pas d'évolution de la géométrie de ces zones depuis la fin des expérimentations nucléaires. En surface, dans la continuité de leur ralentissement global progressif depuis 1996, les déplacements verticaux et horizontaux restent faibles en zone Nord-Est. Dans les zones Camélia et Hélène, les déplacements vers l'océan et la subsidence montrent la poursuite de mouvements à des vitesses globalement similaires à celles des années précédentes. En profondeur, les mesures continues montrent dans leur ensemble des déformations minimales en zone Nord-Est. Les résultats de la dernière campagne topographique périodique (2014) corroborent ces éléments.

Aucun événement sismique n'a été enregistré dans les autres secteurs de l'atoll. Parmi l'activité microsismique détectée, un événement enregistré le 17 avril 2020 s'apparente à un petit éboulement de terrain probablement survenu sur les pentes nord de l'atoll. Cet événement est présenté en annexe.

Depuis 1996, date de la fin des expérimentations à Moruroa, le mouvement est en ralentissement et reste mesurable. Les vitesses estimées sont faibles et ne montrent pas de changement de tendance en 2020 par rapport au bilan géomécanique précédent. L'évolution peut être classée au niveau le plus faible de l'échelle des risques (Tableau 1), témoignant d'une situation normale.

2. La surveillance géomécanique de l'atoll de Moruroa

Après l'arrêt des expérimentations nucléaires français en 1996, et conformément aux recommandations de l'expertise menée par l'International Geomechanical Commission (IGC, présidée par le Pr Fairhurst) en 1999, 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 ainsi que

des habitants de Tureia. Elle comprend deux volets essentiels 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 Fangataufa 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).

L'atoll de Fangataufa, où aucun mouvement n'a été mis en évidence depuis 1992, ne nécessite plus de surveillance continue depuis 1996. Une campagne d'observation périodique a été jugée suffisante.

2.1. Suivi continu de l'évolution de Moruroa

2.1.1. Système de surveillance TELSITE

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

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

2.1.2. Missions du système de télésurveillance

La première mission de TELSITE est de couvrir le risque, dit « à 90 secondes », de déferlement très localisé d'une vague qui serait générée par l'effondrement soudain d'un pan de volume limité de falaise corallienne. Un tel effondrement s'accompagne de vibrations qui sont enregistrées par les capteurs sismiques installés sur le pourtour de l'atoll. Entre le moment où ces vibrations sont enregistrées et celui où une vague pourrait déferler sur le platier, il s'écoule au moins 90 secondes, temps durant lequel les personnes non protégées par le mur « océan » doivent se mettre à l'abri en hauteur ; le personnel situé en Zone Vie (protégée par les murs) est à l'abri de telles vagues. Dans une telle éventualité, le système TELSITE est conçu pour envoyer automatiquement une alerte en direction des personnes présentes sur site et parallèlement, vers les personnels du CEA/DAM en métropole. Les personnes présentes sur site doivent alors appliquer les consignes de sécurité prescrites, jusqu'à ce que l'alerte ait été analysée, traitée et levée par les géophysiciens du CEA/DAM en métropole. Une simulation mensuelle permet de s'assurer du fonctionnement correct de l'ensemble de la chaîne d'alerte.

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

Les signes avant-coureurs d'une éventuelle déstabilisation de grande ampleur, correspondant à un glissement d'une masse importante du massif en zone Nord à Moruroa, seraient repérés plusieurs semaines à plusieurs mois à l'avance grâce aux différents capteurs. L'atoll de Moruroa serait alors évacué préventivement. Dans l'hypothèse la plus pénalisante d'un glissement important, d'un volume de 670 millions de m³ de roches en zone Camélia (c'est-à-dire près de six fois le volume de carbonates déstabilisé lors de l'éboulement en zone Sud-Ouest de Moruroa qui a suivi l'expérience Tydée en juillet 1979), la vague générée pourrait atteindre 20 m de haut au droit de l'évènement. La Zone Vie serait partiellement submergée dans sa partie nord-ouest malgré la protection des murs. A plus longue distance, la propagation de la vague se ferait dans la direction nord-est, vers Tureia, situé à une centaine de kilomètres. Les calculs réalisés au CEA/DAM permettent de considérer que l'amplitude maximale de la vague au large des côtes sud de cet atoll serait de 30 à 50 cm, et que la submersion au niveau de son littoral serait comprise entre 1,5 et 2 m (3 m pour les configurations de côtes les plus pénalisantes). Les zones habitées et les zones d'activités situées au nord ne seraient pas submergées. Des précautions, sous forme d'interdiction d'activités, comme la pêche à pied, seraient mises en place durant la période d'alerte. L'ensemble des dispositions graduelles de sécurité a été consigné dans le Plan Communal de Sauvegarde (PCS) de la commune de Tureia en novembre 2012¹. Ainsi, les dispositions de protection des personnes seraient prises bien avant l'occurrence du phénomène.

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

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

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

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

¹ Cf. Plan Communal de Sauvegarde de la commune de Fakarava et de Tureia, n°391/HC/CAB/DDPC du 20/11/2012.

2.2. Composantes du système de télésurveillance TELSITE

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

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

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

Les Figures 2 à 3 donnent répartition géographique de l'instrumentation au sein de la zone Nord-Est de l'atoll.

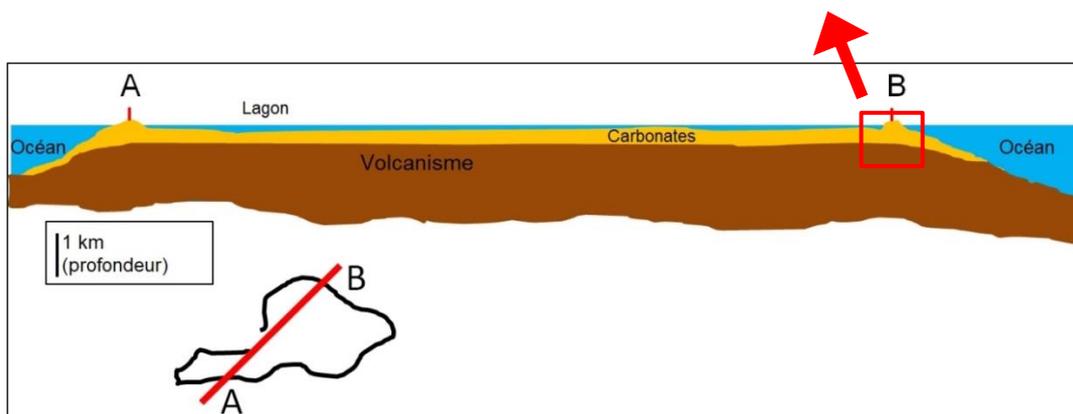
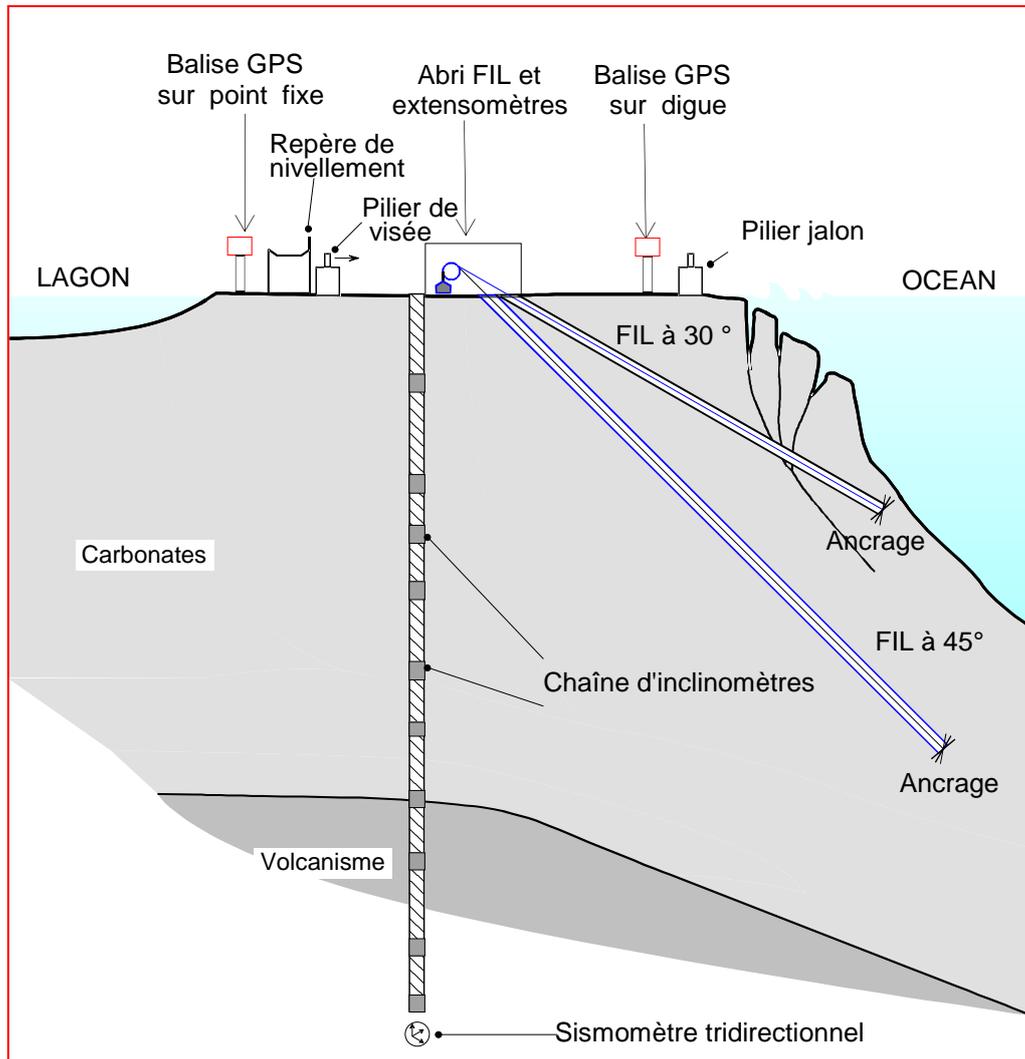


Figure 1 : Schéma de principe (en haut) des instrumentations du système de surveillance continue TELSITE. Cette coupe schématique représente les principaux types de mesures réalisées en zone Nord-Est à Moruroa (localisation sur la coupe du bas). Les déplacements en surface sont mesurés par les stations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

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

Tableau 2 : Capteurs et mesures du système TELSITE.

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

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

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

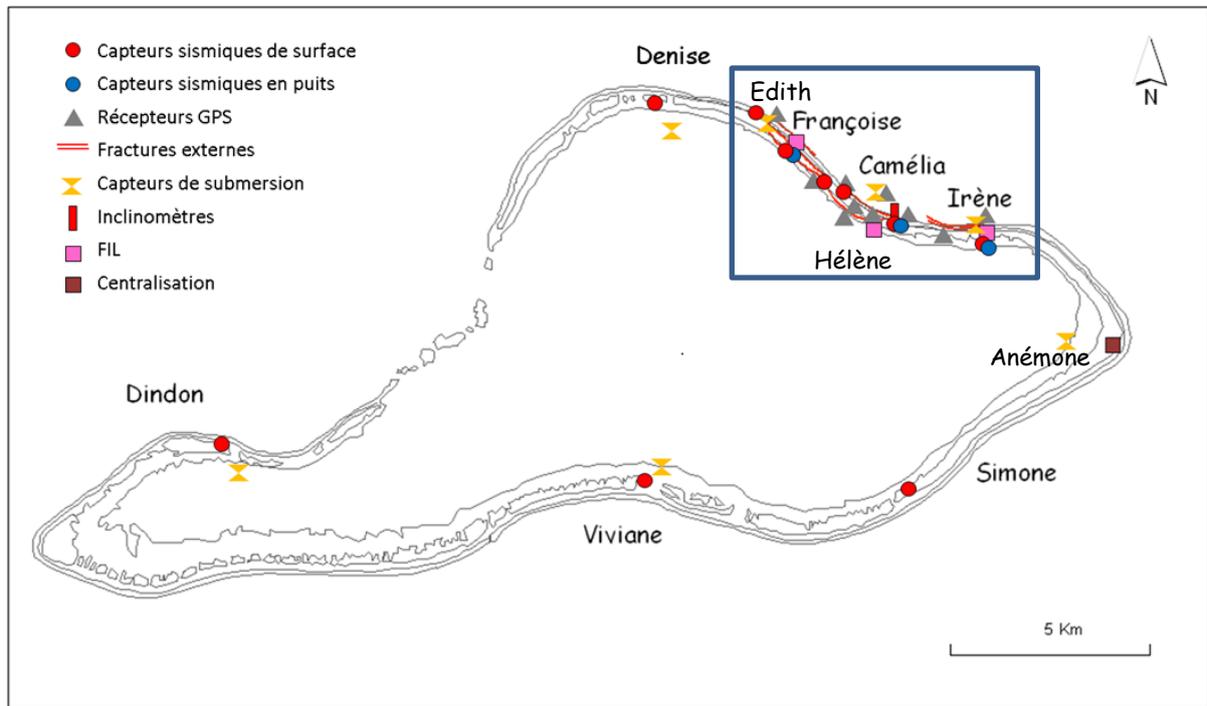


Figure 2 : Implantation de l'instrumentation du système TELSITE.

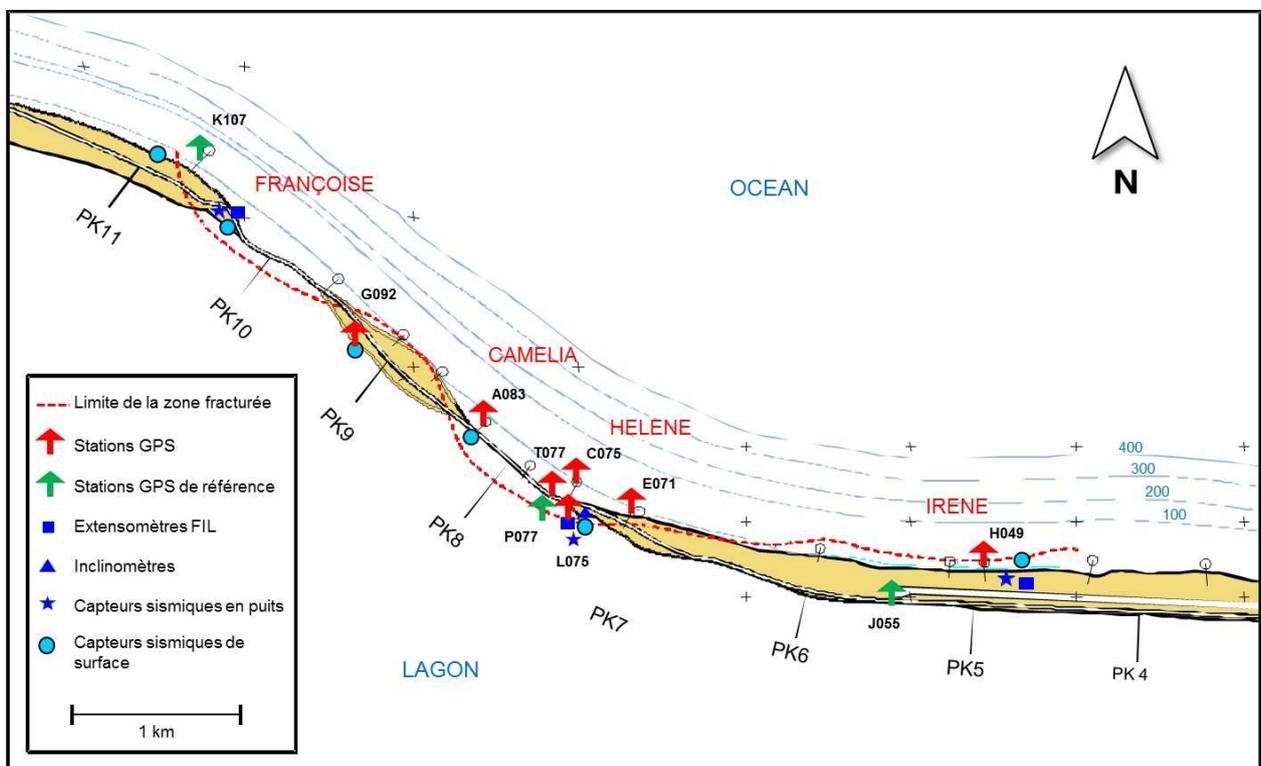


Figure 3 : Détail en zone Nord-Est de l'implantation de l'instrumentation du système TELSITE.

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

Les mesures fournies par le système de télésurveillance sont complétées par des campagnes de mesures topographiques dont la périodicité était de l'ordre de cinq à sept ans depuis la fin des expérimentations, et est maintenant de l'ordre de sept à dix ans (nouveau guide édition 2018), en raison des très faibles taux de déformation mesurés annuellement. Ces campagnes concernent également l'atoll de Fangataufa. La dernière campagne topographique s'est déroulée du 4 mai au 16 juin 2014 à Fangataufa et à Moruroa ; les principaux résultats sont reportés de façon synthétique en annexe de ce document. La précédente campagne avait eu lieu en 2007, la prochaine est envisagée fin 2021.

3. Bilan de l'évolution de la zone Nord-Est mesurée en 2020

3.1. Sismicité

Les événements microsismiques détectés de manière automatique sont analysés en différé par les experts du CEA/DAM qui identifient et localisent ceux associés à des microséismes locaux. Les événements les plus couramment observés sont de type « relâchement de contraintes », terme désignant un séisme de très faible magnitude (microséisme), non ressenti, qui résulte de la libération soudaine et rapide des contraintes accumulées dans les masses de calcaires. D'autres types d'événements sismiques locaux peuvent également se produire, comme des chutes de falaise de volume limité, des petits glissements de terrain ou des éboulements qui peuvent donner lieu à des signaux de plus longue durée et de formes plus complexes. Le 17 avril 2020, le système TELSITE a enregistré un événement interprété comme un éboulement, probablement survenu sur les pentes nord de l'atoll ; celui-ci est présenté en annexe 3.

La répartition géographique des événements enregistrés en 2020 est tout d'abord présentée. La microsismicité est ensuite décrite au regard de son évolution temporelle depuis 1997, en termes de nombres d'événements, puis de magnitude et d'énergie libérée.

Un travail de fusion des données de microsismicité, réalisé en 2020, a permis l'élaboration d'une base de données, à présent unique, pour la période 1980-2020. Lors de cette restructuration, quarante-sept événements, comptabilisés deux fois, ont été mis en évidence sur un total de neuf cent quatre-vingt-huit. Leur suppression a conduit à quelques ajustements, non significatifs pour l'interprétation, du bilan des événements par secteur. Ceux-ci sont à l'origine de modifications minimales des figures présentées dans cette section par rapport à celles présentées les années précédentes.

3.1.1. Répartition spatiale de la sismicité

■ Répartition par secteurs géographiques

La répartition géographique des événements sismiques est représentée sur la Figure 4. Afin d'analyser la sismicité plus aisément, la zone Nord-Est de Moruroa est découpée en quatre secteurs (Figure 4) définis en cohérence avec la localisation de l'instrumentation de TELSITE (l'activité sismique étant de très faible amplitude, le niveau de détectabilité est en effet sensible à la position des capteurs, essentiellement ceux en profondeur, les moins bruités) :

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

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

En 2020, 42 microséismes ont été détectés en zone Nord-Est par le système TELSITE (Figure 4, points rouges) : 11 en Françoise, 6 en Gisèle-Camélia, 13 en Camélia-Hélène et 12 en Irène. Aucun n'a entraîné le déclenchement de l'alerte.

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

■ Répartition en profondeur

Une partie des événements détectés par le passé² a fait l'objet d'une analyse plus précise qui s'est traduite par quelques ajustements des localisations.

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

La répartition en profondeur de la sismicité mesurée au cours de l'année 2020 (Figure 5 à Figure 8) montre, comme par le passé, que l'ensemble des événements³ reste confiné à l'intérieur ou le long des limites hypothétiques des trois masses superficielles carbonatées en mouvement identifiées en zones Françoise

² Les localisations des événements de 2000 et 2003, ainsi que celles de la période de janvier à avril 2004 ont été révisées en 2005 et 2008.

³ Les localisations de quelques événements ont été ré-analysées en 2016, ce qui explique les modifications dans la représentation des événements par rapport aux bilans antérieurs.

(PK10), Camélia (PK8) et Irène (PK5). La plupart des évènements détectés en 2020 ont en effet des profondeurs inférieures à 400 mètres, seuls quelques-uns sont localisés au-delà et, comme détaillé dans le §3.1.2, tous sont de très faible magnitude.

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

En carte (Figure 4) comme en coupe (Figure 7), le secteur Camélia-Hélène présente, sur la totalité de la période de mesure, la microsismicité la plus faible et une proportion d'évènements détectés en 2020 qui semble plus importante, ce point est discuté plus loin (§3.1.2).

En 2020, 42 microséismes ont été détectés en zone Nord-Est, aucun n'a déclenché d'alerte. Les mesures sismiques enregistrées depuis 2006 ne traduisent pas de modification des emprises ou des volumes potentiels de glissement par rapport aux années antérieures. Depuis la fin des expérimentations nucléaires, la localisation de la sismicité en zone Nord-Est à Moruroa reste inchangée au cours du temps et ne révèle pas d'évolution particulière de la géométrie dans les secteurs du nord-est de l'atoll.

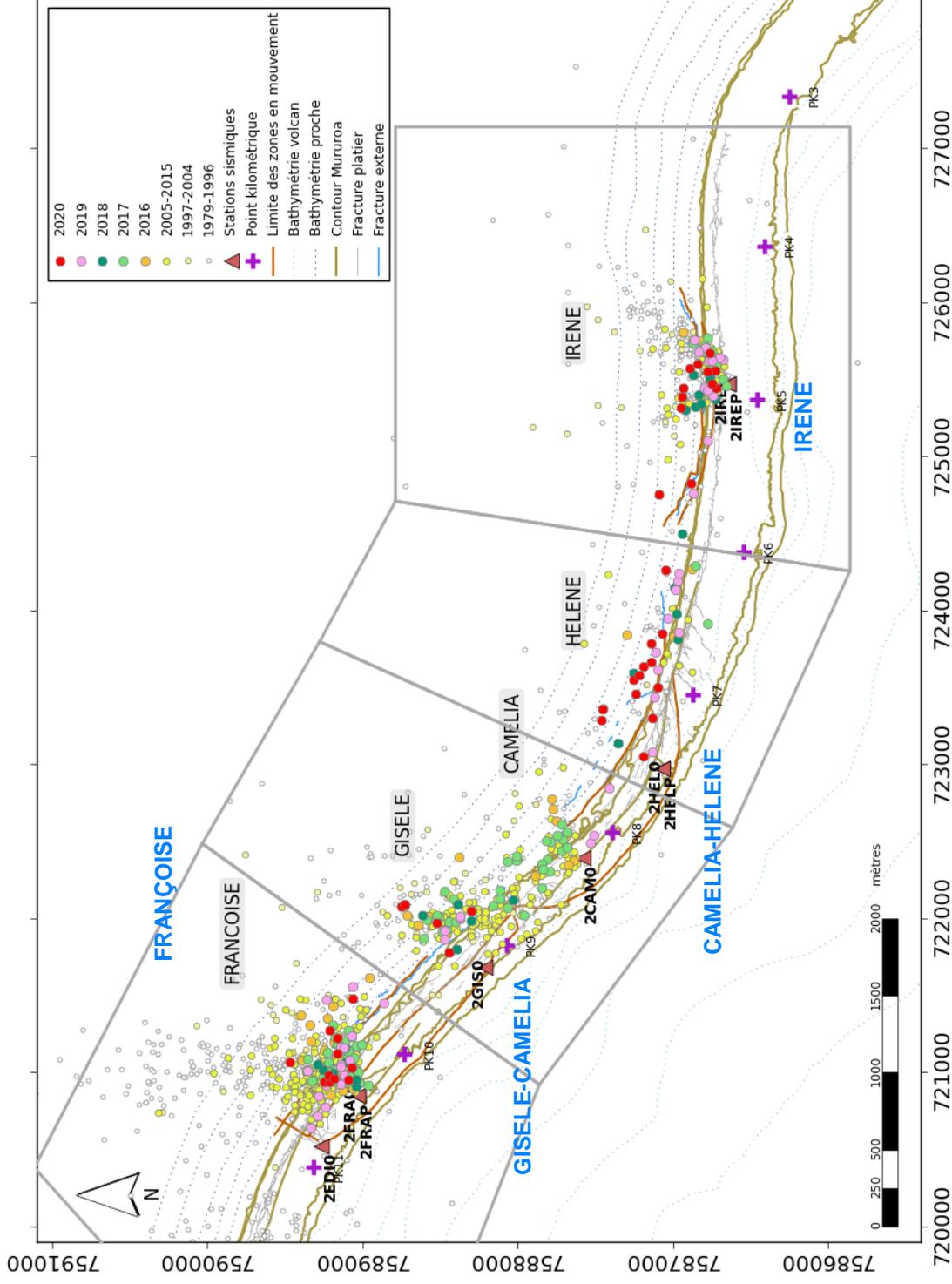


Figure 4 : Historique de la répartition spatiale de la microsismicité en zone Nord-Est (cercles colorés par période) et stations sismiques de TELSITE (triangles) utilisées dans le processus de localisation. Les quatre secteurs définis pour l'analyse de la sismicité sont notés en bleu.

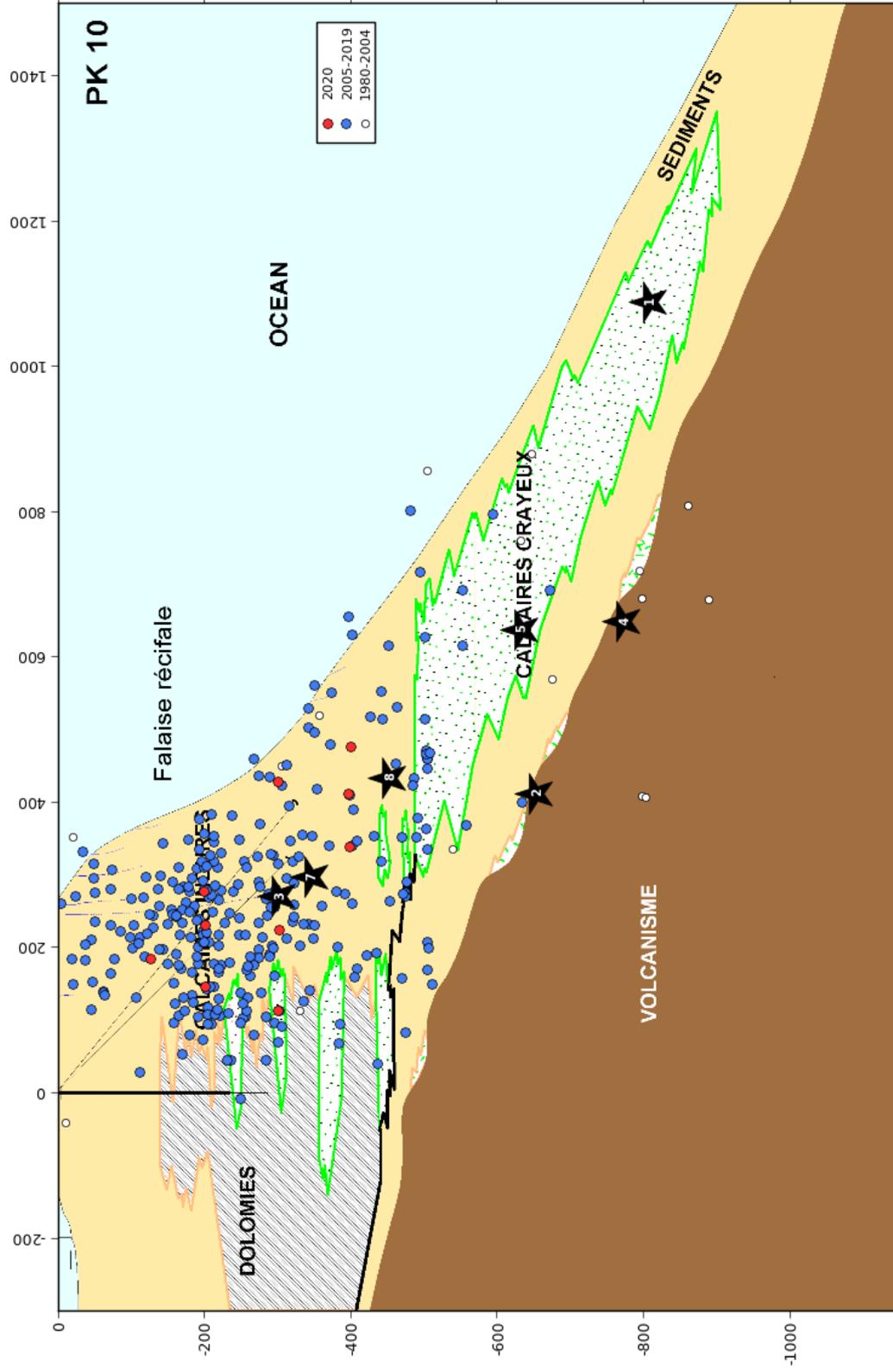


Figure 5 : Projection sur une coupe géologique traversant le secteur Française des hypocentres enregistrés de 2005 à décembre 2020 (cercles colorés par période). Les étoiles noires indiquent les événements ayant déclenché des alertes (1 : 01/04/2003, 2 : 27/11/2006, 3 : 29/11/2006, 4 : 02/10/2006, 5 : 12/01/2007, 7 : 15/09/2009, 8 : 19/09/2009). Le puits vertical de l'instrumentation de TELSITE est indiqué par le trait noir vertical.

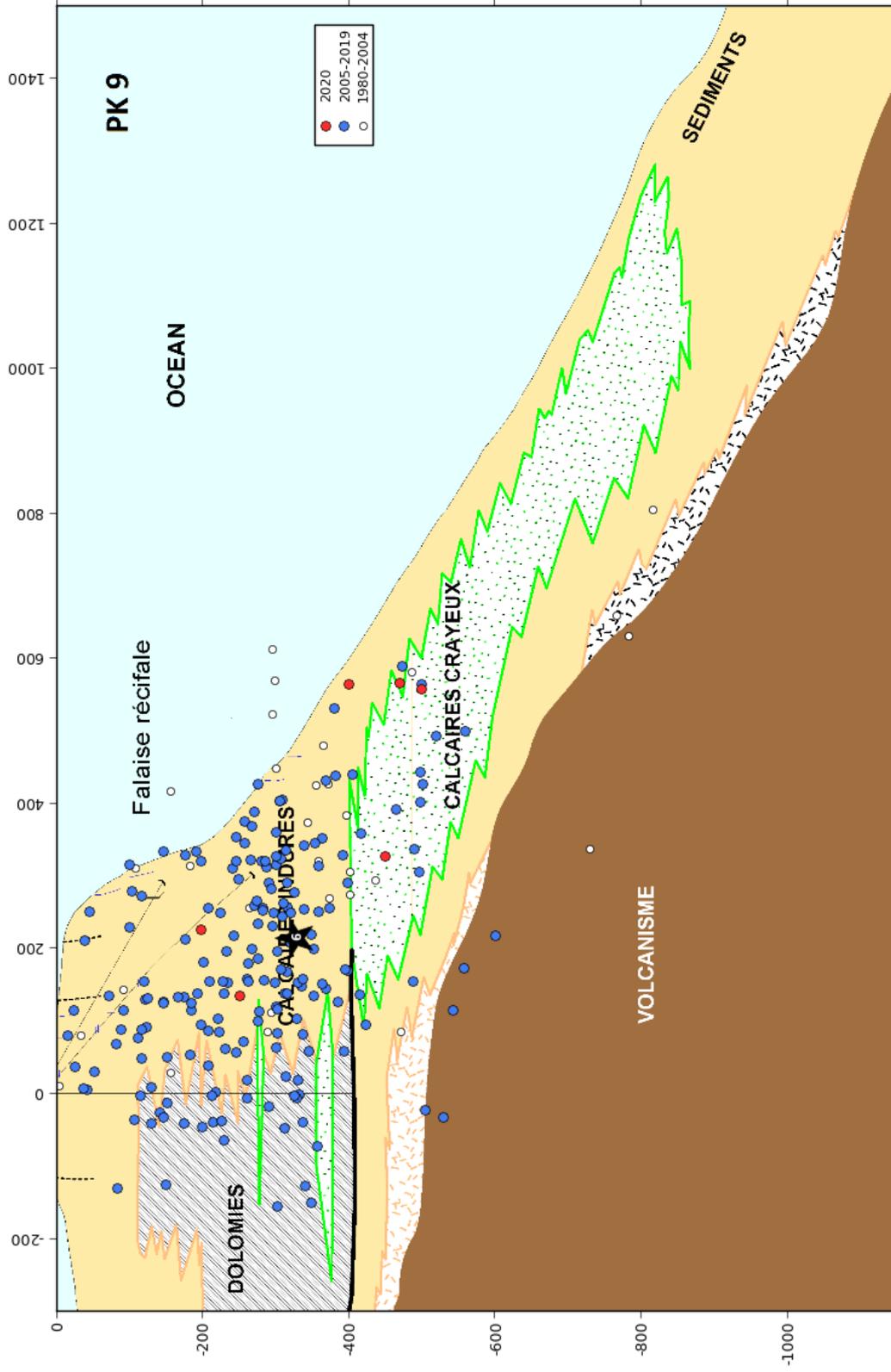


Figure 6 : Projection sur une coupe géologique traversant le secteur Gisèle-Camélia des hypocentres enregistrés de 2005 à décembre 2020 (cercles colorés par période). L'étoile noire indique l'évènement ayant déclenché une alerte (le 11/10/2007).

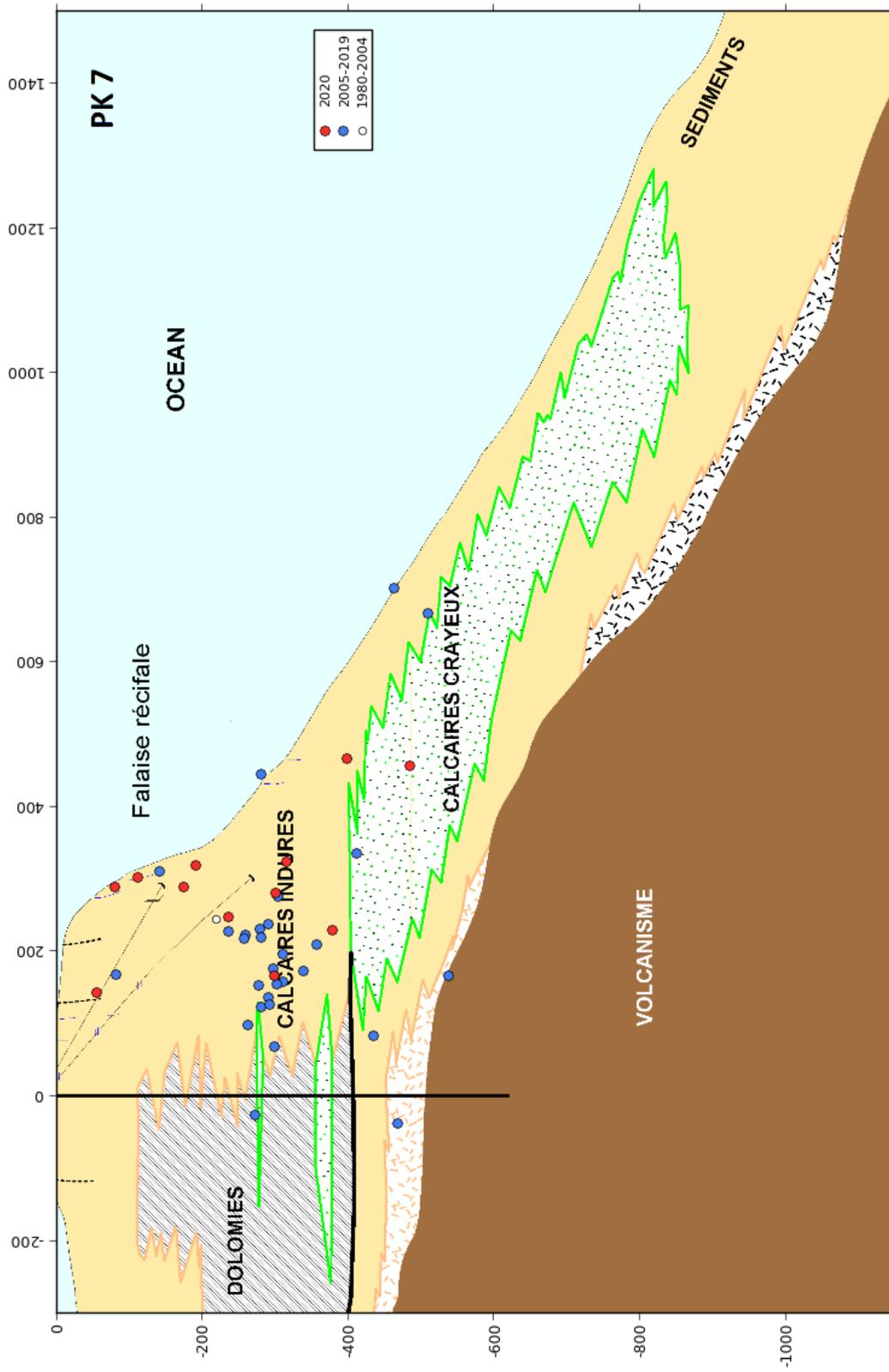


Figure 7 : Projection sur une coupe géologique traversant le secteur Camélia-Hélène des hypocentres enregistrés de 2005 à décembre 2020 (cercles colorés par période). Le puits vertical de l'instrumentation de TELSITE est indiqué par le trait noir vertical.

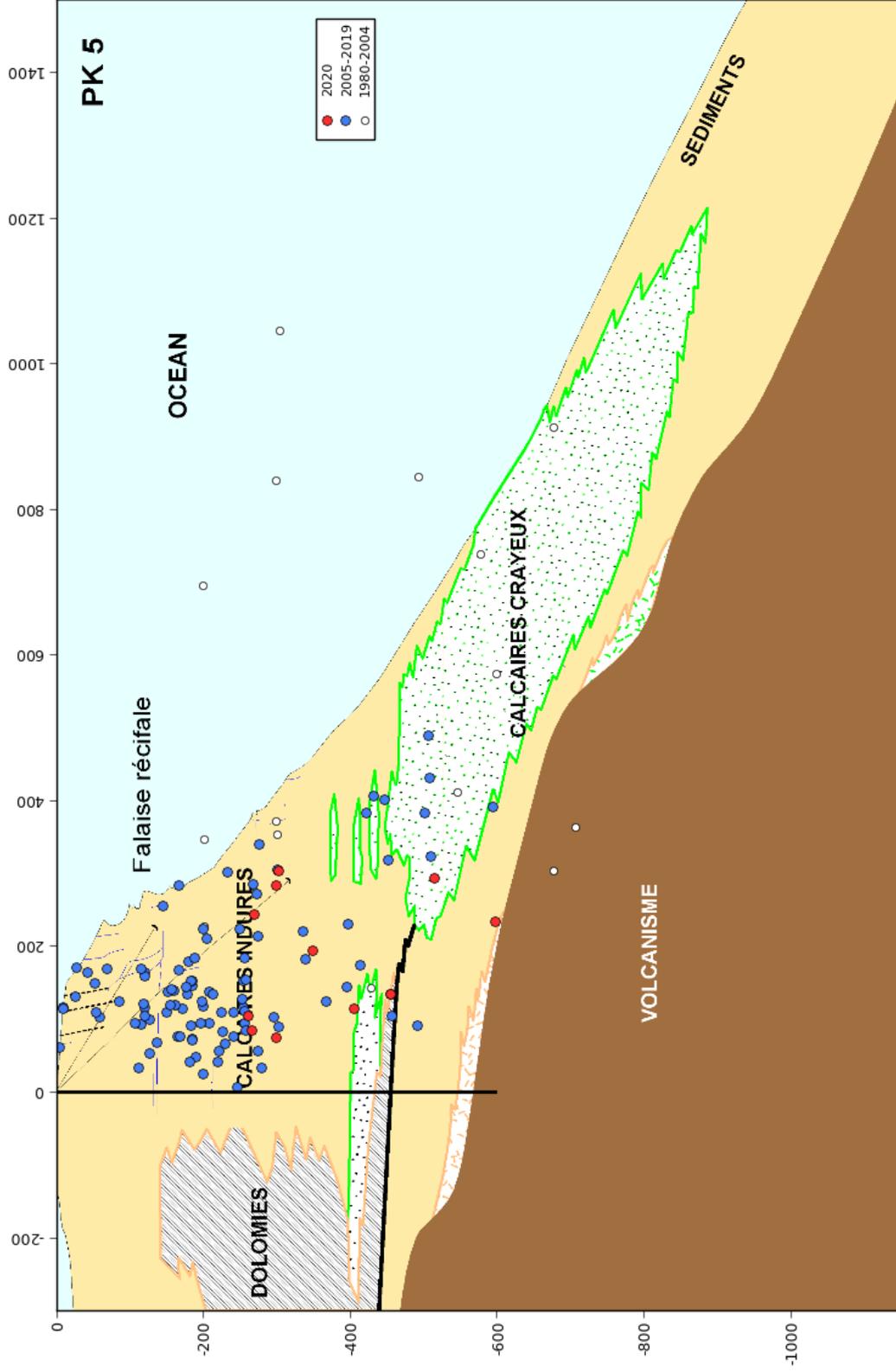


Figure 8 : Projection sur une coupe géologique traversant le secteur Irène des hypocentres enregistrés de 2005 à décembre 2020 (cercles colorés par période). Le puits vertical de l'instrumentation de TELSITE est indiqué par le trait noir vertical.

3.1.2. Evolution temporelle de l'activité sismique

Les 42 microséismes détectés en 2020 représentent une moyenne de 0,81 évènement par semaine pour l'ensemble de la zone Nord-Est (Figure 9). Ce taux de sismicité reste à un niveau comparable à celui d'un par semaine considéré comme représentatif d'une activité normale (Tableau 6). Il reflète une très faible activité microsismique dans toute la zone Nord-Est comme le montrent, pour chaque secteur, l'évolution temporelle de la microsismicité (Figure 9) et les courbes des nombres d'évènements cumulés (Figure 10) :

- Dans le secteur Françoise, après une hausse en 2017, l'activité microsismique a diminué, elle reste faible en 2020 avec onze évènements détectés.
- Après avoir augmenté en 2016 et en 2017, le taux de microsismicité du secteur Gisèle-Camélia est, depuis 2018, revenu à un niveau très faible avec six évènements enregistrés en 2020.
- Alors que très peu d'évènements avaient été enregistrés dans le secteur Camélia-Hélène les années précédentes, cinq l'ont été en 2018, neuf en 2019 et treize en 2020. Ces valeurs reflètent vraisemblablement une meilleure détectabilité dans ce secteur apportée par la station de profondeur en zone Hélène, nouvellement implantée lors de la mise en place du système TELSITE actuel. Pour une activité sismique de très faible amplitude, le niveau de détectabilité est en effet très sensible à la géométrie du réseau de stations. La durée d'exploitation du système est encore courte (vingt-huit mois), mais la surveillance à plus long terme devrait permettre de confirmer cette amélioration de performance en détection.
- Dans le secteur Irène, l'activité microsismique reste stable (la pente du nombre d'évènements cumulés varie peu depuis fin 2013) et faible, avec douze évènements détectés en 2020.

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

En 2020, le taux de microsismicité reste à un niveau très faible dans tous les secteurs de la zone Nord-Est ; il est en moyenne de 0,81 évènement par semaine.

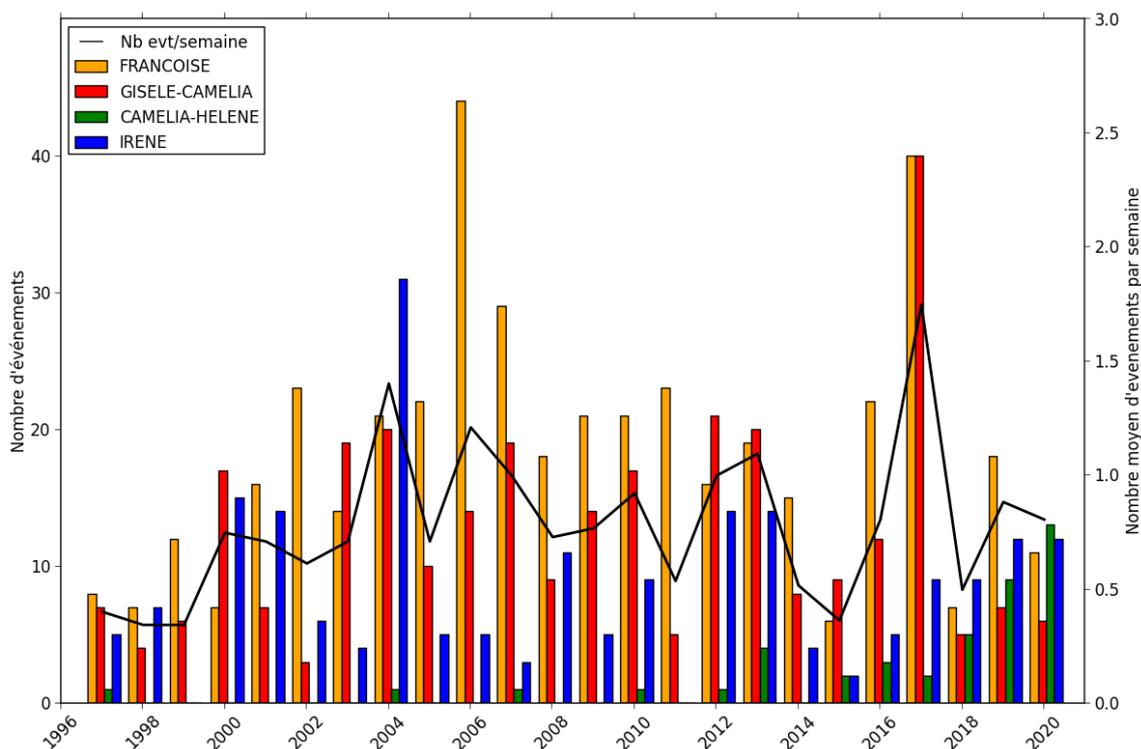


Figure 9 : Evolution temporelle de l'activité microsismique annuelle de 1997 à 2020 pour chacun des secteurs de la zone Nord-Est associés au système TELSITE (barres, axe de gauche) et nombre moyen annuel d'événements par semaine pour l'ensemble du secteur Nord-Est (courbe noire, axe de droite).

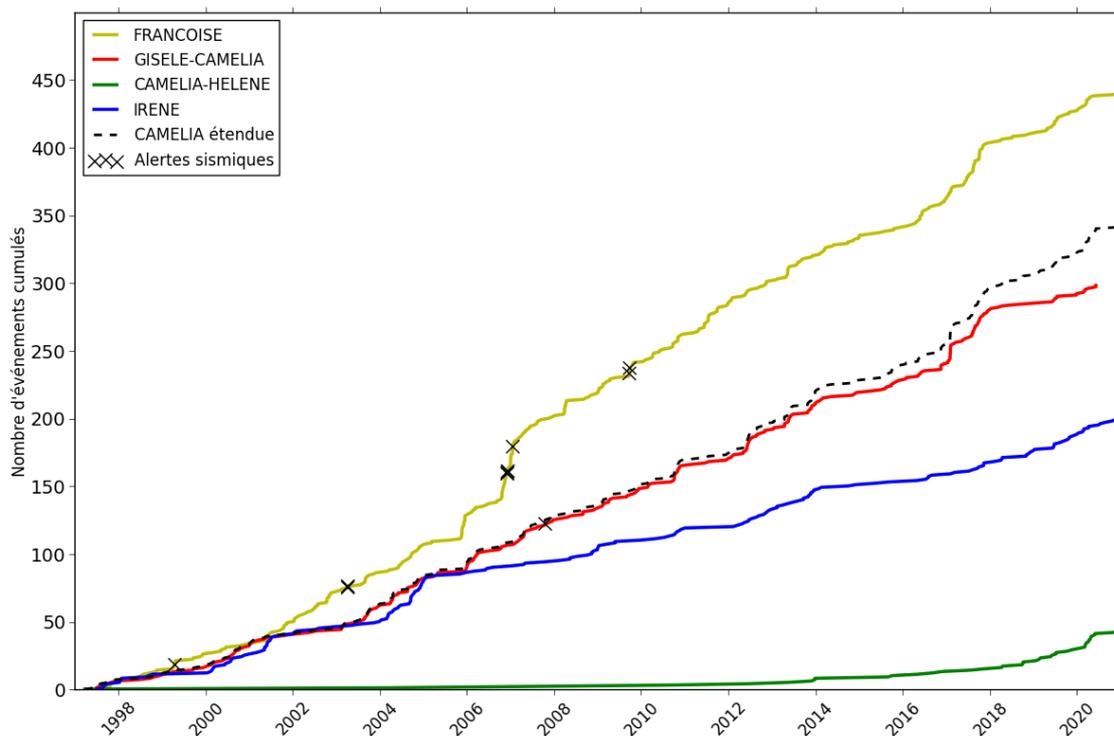


Figure 10 : Courbes du nombre d'événements cumulés de 1997 à 2020 pour chacun des secteurs de la zone Nord-Est associés à TELSITE. La courbe pointillée (Camélia "étendue") représente la somme des contributions des courbes rouge (Gisèle-Camélia) et verte (Camélia-Hélène). Les croix et la courbe sur laquelle elles sont reportées indiquent les dates des microséismes ayant déclenché des alertes et la zone concernée.

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

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

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

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

Cette formule ne comporte pas de terme d'atténuation dépendant de la distance car elle est utilisée pour de très faibles distances, quelques kilomètres au plus. Un terme d'atténuation classique s'appliquerait pour des distances supérieures à 100 km environ.

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

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

En 2020, outre leur faible occurrence, les évènements enregistrés sont caractérisés par des magnitudes très faibles, toutes inférieures ou égales à 0,51 (Figure 11). Le seuil en magnitude M_L du système automatique d'alerte étant de 1,35 aucune alerte n'a donc été déclenchée.

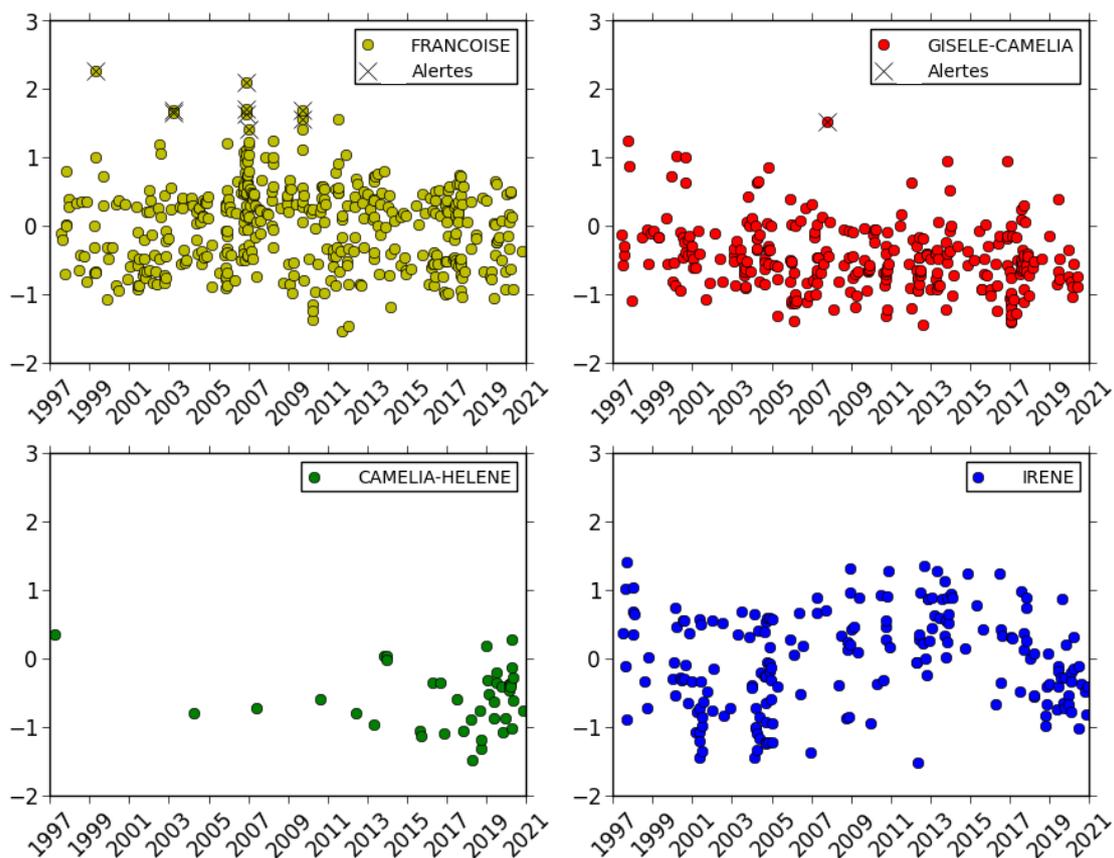


Figure 11 : Distribution temporelle des magnitudes M_L de 1997 à 2020 pour les secteurs Française, Irène, Gisèle-Camélia et Camélia-Hélène.

Sur l'ensemble de la période 1997-2020 (Figure 12, barres bleues), plus de 97% des évènements ont des magnitudes M_L inférieures ou égales à 1. Ces valeurs correspondent à des microséismes non ressentis. En 2020 (Figure 12, barres rouges), les évènements sont tous de magnitude inférieure à 1 et environ 81% d'entre eux sont de magnitude inférieure ou égale à 0. À noter que les quelques 2,4% de magnitude entre 0,5 et 1 correspondent à un seul évènement en zone Française dont la magnitude est 0,51.

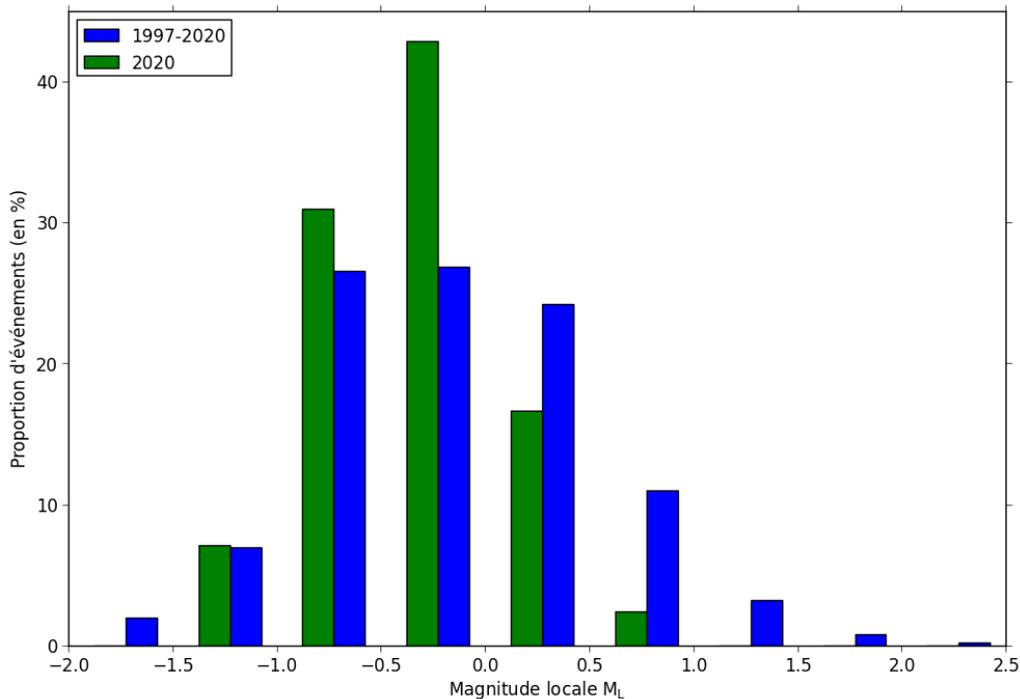


Figure 12 : Distribution de la proportion de relâchements de contraintes, en pourcentage, détectés en zone Nord-Est en fonction de leur magnitude locale M_L sur la période 1997-2020 (en bleu) et sur l'année 2020 (en vert).

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

$$E = 5.10^{-5} M_0 \quad (\text{Kanamori, 1977}) \quad (1)$$

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

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

Cette approche est présentée plus en détail en annexe 1.

La relation (2) conduit à des estimations de moment sismique comprises entre $7,2 \cdot 10^{14}$ et $1,0 \cdot 10^{17}$ dyne-cm (soit entre $7,2 \cdot 10^7$ et $1,0 \cdot 10^{10}$ N·m) en 2020. Ces valeurs sont comparables ou inférieures, selon les zones, à celles de 2019 et à celles observées antérieurement à 1997.

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

- Pour le secteur François, l'énergie cumulée depuis 1997 est de $5,3 \cdot 10^{15}$ ergs (Figure 13, courbe jaune). Cette valeur, la plus importante de la zone Nord-Est, résulte du fait que les magnitudes les plus fortes ont été enregistrées dans cette zone. 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. Depuis 2011, hormis une hausse en 2017, l'évolution est régulière, en lien avec une activité sismique faible tant en nombre d'événements qu'en magnitude. Pour l'année 2020, l'activité microsismique représente une libération d'énergie de $1,6 \cdot 10^{13}$ ergs.
- Pour le secteur Irène, le bilan énergétique cumulé depuis 1997 est de $1,2 \cdot 10^{15}$ ergs (Figure 13, courbe bleue), soit une valeur 4 à 5 fois inférieure à celle de François. Alors que de 2009 à 2016, des événements de magnitude M_L supérieure à 1 avaient été enregistrés régulièrement, aucun n'a été détecté depuis 2017. Pour l'année 2020, l'activité microsismique représente une libération d'énergie de $6,0 \cdot 10^{12}$ ergs.
- Pour le secteur Gisèle-Camélia, l'énergie libérée depuis 1997 reste faible (Figure 13, courbe verte), elle est de $4,7 \cdot 10^{14}$ ergs, soit plus de dix fois inférieure à celle de François. Le bilan énergétique pour 2020 est de $4,2 \cdot 10^{11}$ ergs.
- Pour le secteur Camélia-Hélène, le bilan énergétique depuis 1997, de $1,8 \cdot 10^{13}$ ergs, est le plus faible de la zone Nord-Est (Figure 13, courbe rouge), environ trois cents fois inférieur à celui de François. L'énergie libérée en 2020 est de $5,6 \cdot 10^{12}$ ergs.

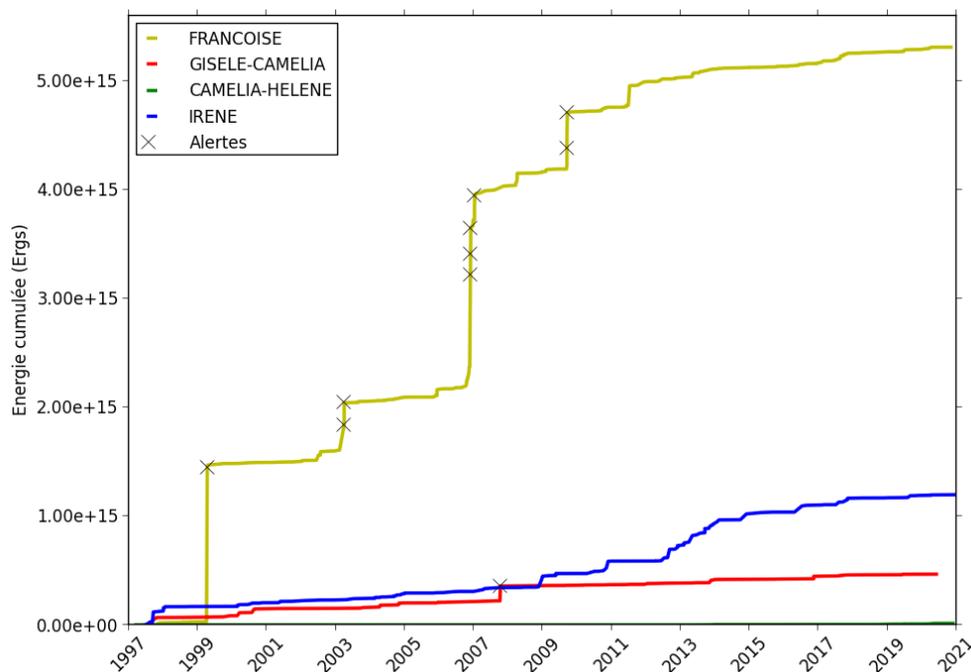


Figure 13 : Comparaison des énergies cumulées de 1997 à fin 2020 pour les quatre secteurs de la zone Nord-Est : François (en jaune), Irène (en bleu), Gisèle-Camélia (en rouge) et Camélia-Hélène (en vert). Les croix et la courbe sur laquelle elles sont reportées indiquent les dates des microséismes ayant déclenché des alertes et la zone concernée.

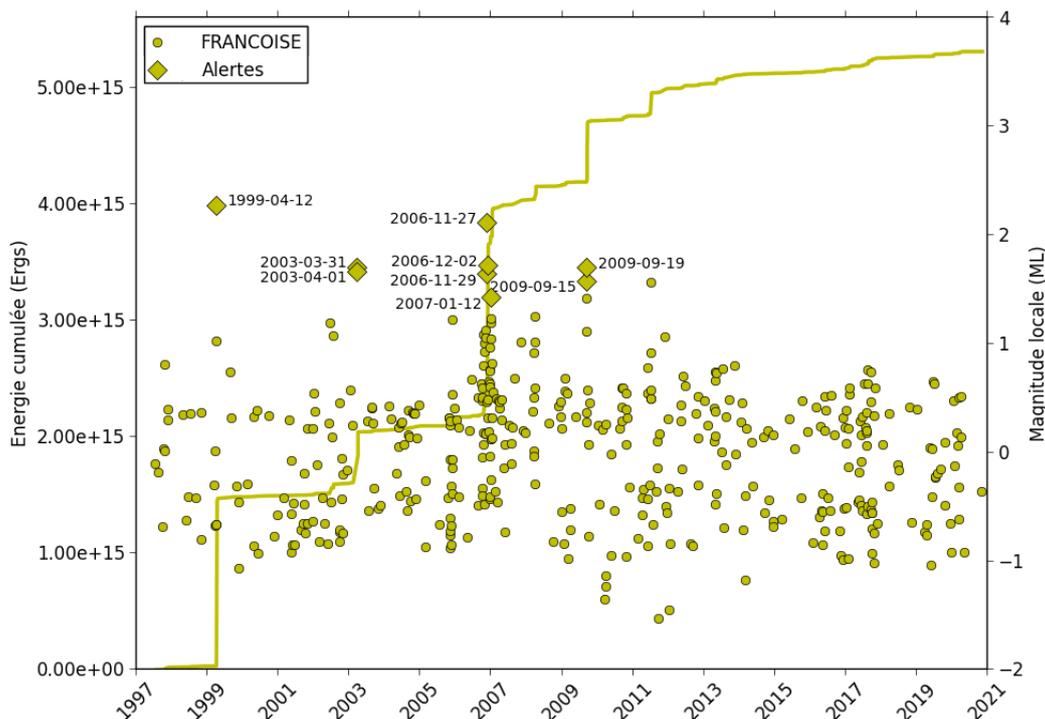


Figure 14 : Energies cumulées (courbes, axe des ordonnées de gauche) pour les évènements de 1997 à fin 2020 et magnitudes M_L associées (cercles, axe des ordonnées de droite) de la zone Française. Les losanges étiquetés représentent les évènements, de magnitude M_L supérieure à 1,5, ayant déclenché des alertes.

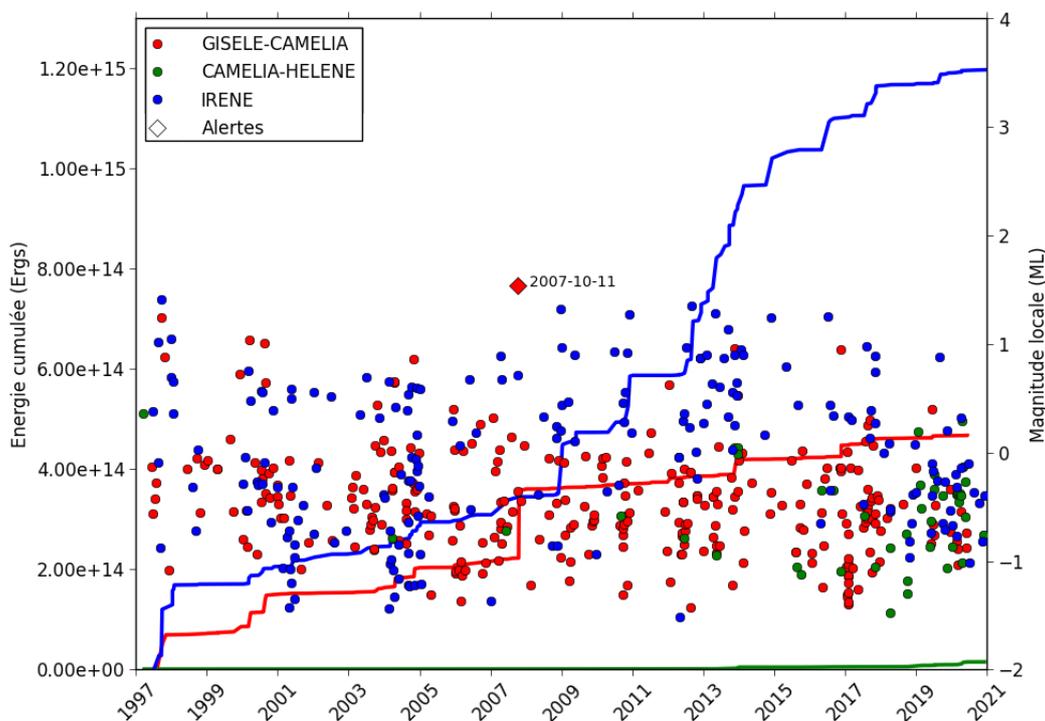


Figure 15 : Energies cumulées (courbes, axe des ordonnées de gauche) pour les évènements de 1997 à fin 2020 et magnitudes M_L associées (cercles, axe des ordonnées de droite) des zones Irène (en bleu), Gisèle-Camélia (en rouge) et Camélia-Hélène (en vert). Le losange étiqueté représente l'évènement, de magnitude M_L supérieure à 1,5, ayant déclenché une alerte en zone Gisèle-Camélia.

Pour l'année 2020, le bilan énergétique, dans les quatre secteurs de la zone Nord-Est, traduit le très faible niveau de magnitude des évènements enregistrés. L'énergie libérée du secteur Française reste la plus importante en 2020 ; celles des secteurs Irène et Camélia-Hélène sont deux à trois fois plus faibles, celle du secteur Gisèle-Camélia environ quarante fois.

3.2. Déplacements et déformations en surface

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

3.2.1. Le réseau GPS de TELSITE

Le système TELSITE comporte dix stations GPS (Figure 16), leurs noms font référence aux PK où elles sont installées :

- **H049** en bout de digue Hotel côté océan ;
- **J055** sur le platier côté lagon, dans un secteur stable, à l'extrémité occidentale de la piste ;
- **E071** en bout de digue Echo côté océan ;
- **L075** sur l'abri FIL de la plate-forme Hélène côté lagon ;
- **C075** en bout de digue Charlie-Delta côté océan ;
- **T077** en bord de route ;
- **P077** sur la digue D77N côté lagon ;
- **A083** sur le toit d'un abri en zone Camélia ;
- **G092** en zone Gisèle côté lagon ;
- **K107** en bout de digue Kilo côté océan.



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

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

Les déformations en surface sont estimées en calculant les mouvements relatifs entre deux stations. Ainsi, l'évolution au cours du temps de la ligne de base J055-A083, par exemple, permet d'évaluer le déplacement d'A083 par rapport à J055 considérée comme fixe. Les vitesses des déformations sont déduites des pentes des séries temporelles pour les trois composantes du déplacement (Est, Nord et verticale) des lignes de base considérées. Il faut cependant noter que, les nouvelles stations GPS, suite à la jouvence du système, n'étant opérationnelles que depuis fin août 2018, les vitesses ne peuvent pas encore être évaluées avec une grande précision. En effet, hormis les possibles déformations permanentes, toute série temporelle de positions GPS montre en particulier des variations transitoires saisonnières. Celles-ci sont à l'origine de signaux cycliques, visibles par exemple sur les mesures de la ligne de base J055-A083. Ces variations se superposent aux déformations permanentes entravant l'estimation de leur vitesse, d'autant plus lorsque, comme au sein de la zone Nord-Est de Moruroa, les déplacements examinés sont faibles. Blewitt et Lavallée (2002)⁴ ont montré que le biais sur l'estimation des vitesses engendré par les termes saisonniers devenait négligeable pour des mesures sur plus de 4,5 ans et qu'il pouvait être très important pour des enregistrements d'une durée inférieure à 2,5 ans.

Les données GPS de TELSITE n'étant disponibles que depuis fin août 2018, leur interprétation en termes de déformations permanentes, exposée ci-après, doit être considérée avec prudence. Les résultats devront être ajustés ou précisés lorsque des mesures auront été acquises sur une période plus longue.

⁴ Blewitt, G., Lavallée, D., Effect of annual signals on geodetic velocity, J. Geophys. Res., 107 (B7), 2002.

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

Avant la mise en place du système TELSITE actuel, les déplacements en surface étaient examinés à partir des enregistrements des stations GPS, moins nombreuses, du dispositif précédent. Ils étaient estimés par rapport à la station JEANNE, équivalent de la station J055 actuelle, située sur le platier côté lagon en zone stable (Figure 16).

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

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

■ Déplacements mesurés par rapport à la station J055

Les déplacements issus des mesures GPS de TELSITE de septembre 2018 à décembre 2020 sont tout d'abord examinés par rapport à la station J055 qui a remplacé la station JEANNE de TELSITE en zone stable côté lagon.

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

- J055-K107 : aucun déplacement ne peut être extrait avec fiabilité des vingt-huit mois d'enregistrements, les plus bruités et présentant les plus fortes variations saisonnières parmi les neuf lignes de base. Ceux-ci permettent cependant d'écarter l'occurrence de déformations permanentes plus rapides que celles observées depuis la fin des expérimentations nucléaires.
- J055-G092 : aucun mouvement global quantifiable, ni horizontal, ni vertical, n'est détecté. Les données disponibles suggèrent de très faibles composantes vers l'est et vers le nord, mais seule une plus longue période de mesure permettra de les confirmer et, le cas échéant, de les estimer.
- J055-A083 : les faibles subsidence et déplacement vers l'est-nord-est, entrevus les deux années précédentes, se confirment. D'après les données actuellement disponibles, la subsidence est de

l'ordre de 0,1 à 0,2 mm/mois, la composante vers l'est d'environ 0,3 mm/mois, et celle vers le nord n'excède pas 0,1 mm/mois. Ces estimations, en bon accord avec celles obtenues entre 2016 et août 2018 pour la ligne de base JEANNE-ALPHA de TELSITE, doivent être considérées avec prudence ; le suivi à plus long terme pourra confirmer et affiner ces tendances.

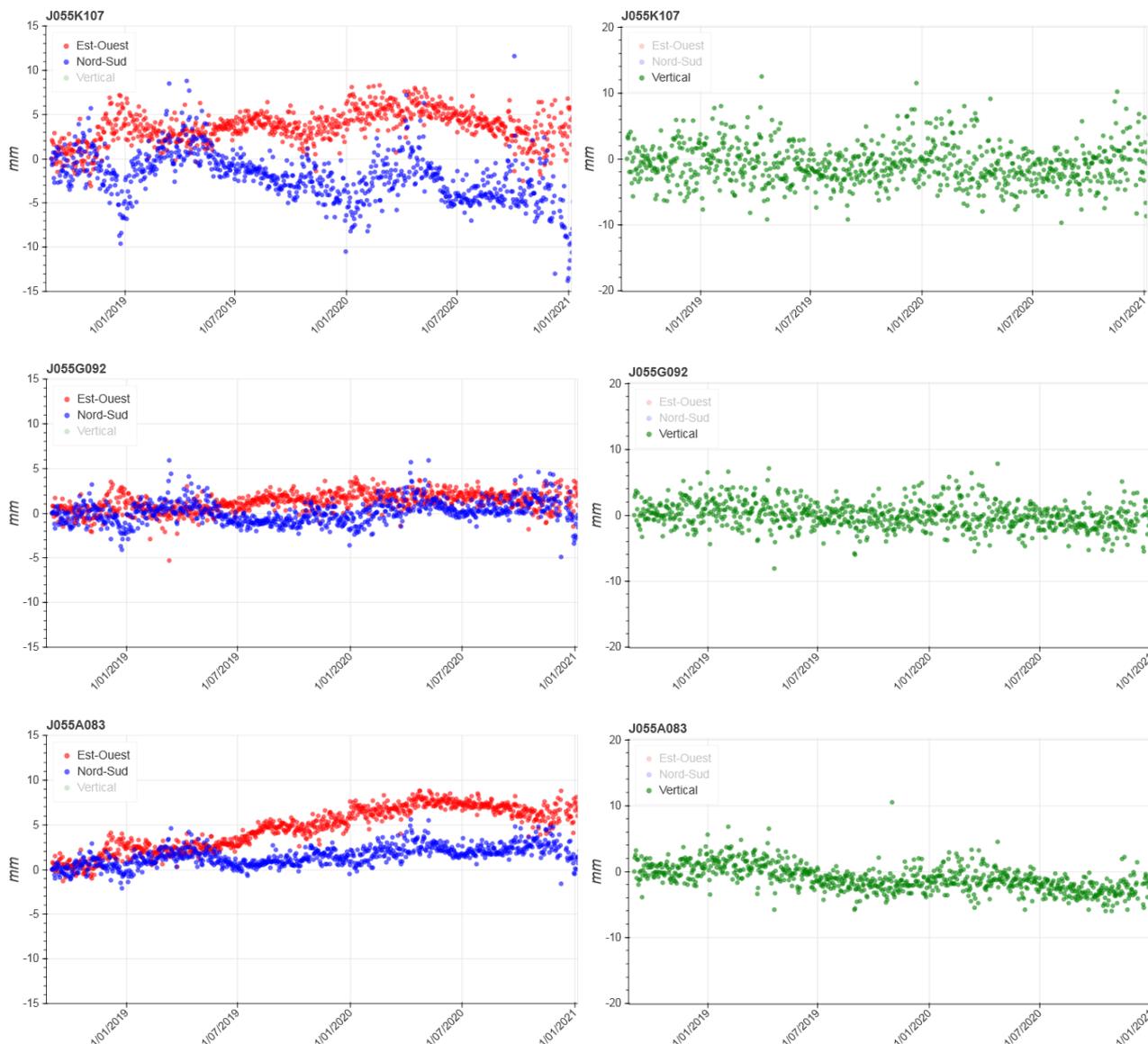


Figure 17 : A gauche, composantes Est (en rouge) et Nord (en bleu), à droite composante verticale (en vert) des déplacements par rapport à la station GPS de référence J055 des stations K107, G092 et A083 de septembre 2018 à décembre 2020.

Les données de septembre 2018 à décembre 2020 des stations situées à proximité de la zone Hélène (P077, T077, L075 et C075) montrent toujours des mouvements faibles par rapport à J055 (Figure 18). Les mesures disponibles des quatre lignes de base suggèrent des déplacements globalement cohérents, les enregistrements sont trop courts pour extraire avec fiabilité des estimations et des différences entre les quatre stations :

- Un déplacement vers le nord se dégage, la vitesse est toutefois faible, de l'ordre de 0,1 à 0,2 mm/mois.

- Le mouvement vers l'est apparaît nul ou très faible.
- Les composantes verticales montrent une faible subsidence, d'environ 0,1 à 0,2 mm/mois.

Les estimations pour J055-C075, bien que de faible précision, sont en bon accord avec les derniers résultats obtenus pour la ligne de base JEANNE-GPS1 du système précédent TELSITE.

Pour les deux stations les plus à l'est (E071 et H049), les tendances sur l'ensemble de la période de mesure ne montrent pas de déplacements significatifs par rapport à J055 (Figure 19) :

- J055-E071 : aucun mouvement global, ni horizontal, ni vertical, ne peut être identifié sur la période de mesure. En l'absence de toute observation le corroborant, le saut visible début juin 2020 sur sa composante Nord, de l'ordre de -2 mm, est attribué à une perturbation locale de l'antenne.
- J055-H049 : suite à une tempête qui l'avait arrachée, l'antenne de H049 avait été repositionnée légèrement en retrait de son emplacement initial en mars 2019. Pour être analysées rigoureusement, les séries temporelles de H049 doivent être prises en compte à partir de cette date uniquement. L'antenne, à nouveau arrachée par une tempête début juin 2020, n'a pas pu être remplacée en 2020, la mission de maintenance du système de surveillance, reportée en raison de la crise sanitaire de la Covid-19, a eu lieu en janvier-février 2021. Les mesures disponibles sont trop courtes (14,5 mois) pour identifier et estimer de manière robuste des déplacements ; elles permettent en revanche d'écarter l'occurrence de déformations permanentes rapides.

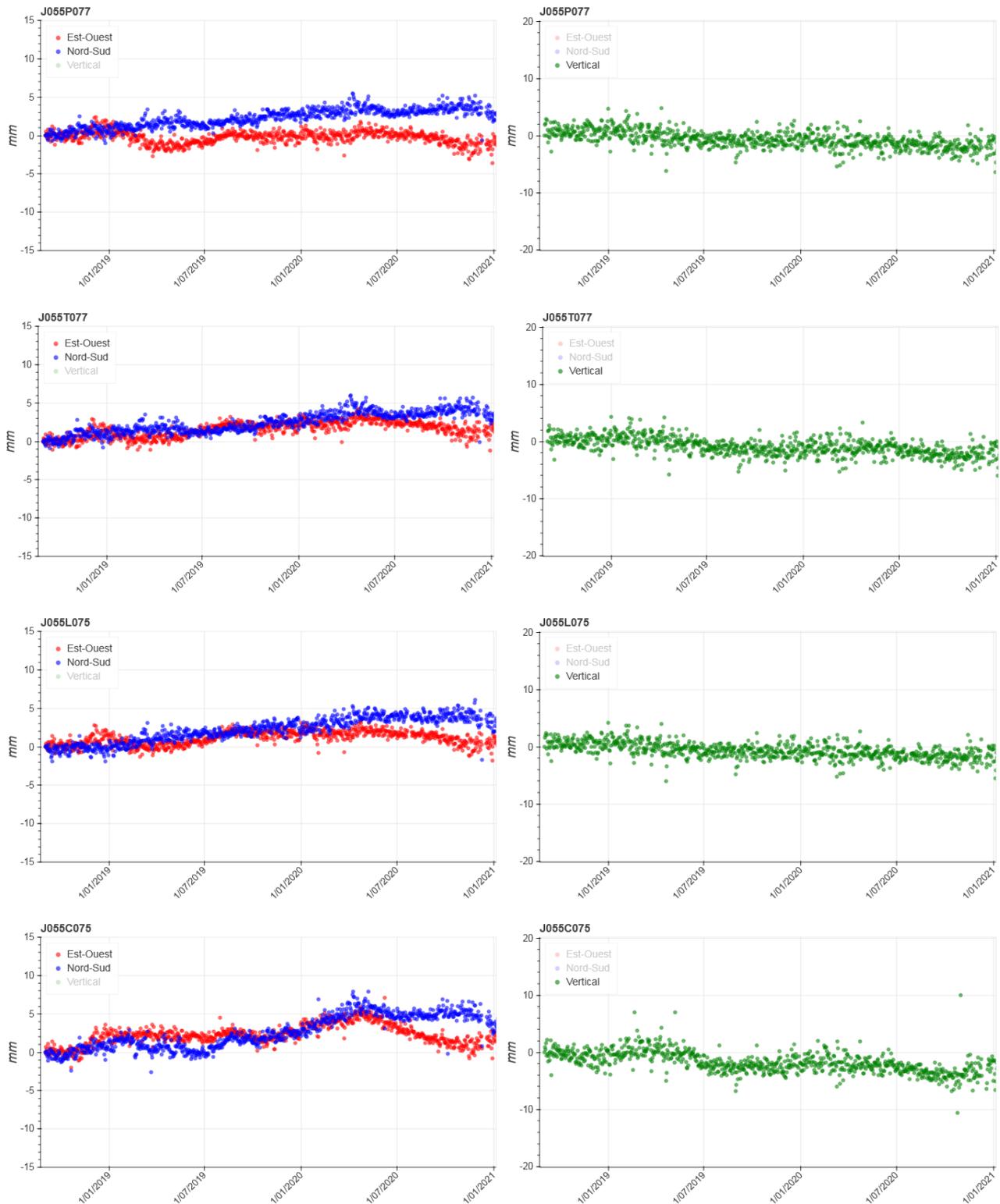


Figure 18 : A gauche composantes Est (en rouge) et Nord (en bleu), à droite composante verticale (en vert) des déplacements par rapport à la station GPS de référence J055 des stations en zone Hélène P077, T077, L075 et C075 de septembre 2018 à décembre 2020.

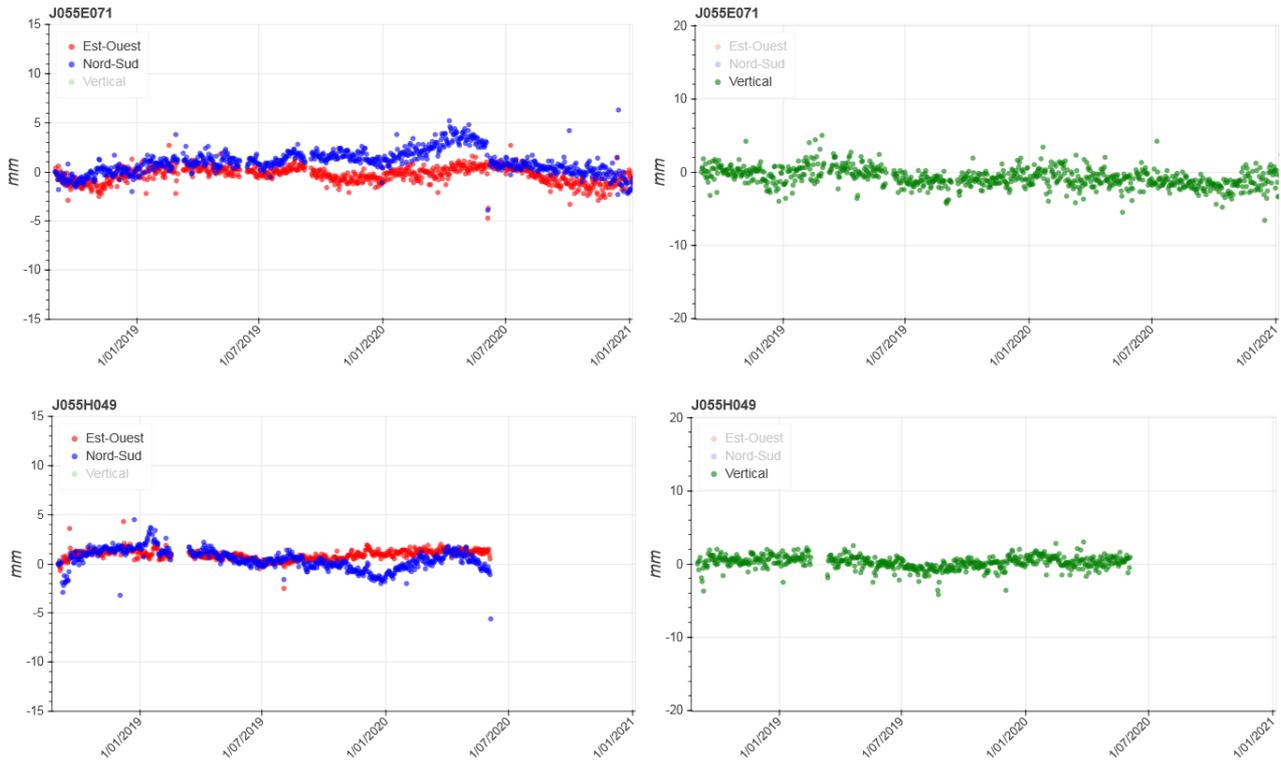


Figure 19 : A gauche composantes Est (en rouge) et Nord (en bleu), à droite composante verticale (en vert) des déplacements par rapport à la station GPS de référence J055 des stations E071 et H049 de septembre 2018 à décembre 2020.

■ Déplacements mesurés par rapport à la station P077

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

- P077-T077 et P077-L075 montrent des composantes vers l'est et vers le nord extrêmement faibles, aucun mouvement vertical ne peut être spécifié.
- Les enregistrements de P077-C075 révèlent un mouvement vers le nord de l'ordre de 0,1 mm/mois et un moindre déplacement vers l'est, plus incertain. Une très faible subsidence inférieure à 0,1 mm/mois apparaît, mais les variations cycliques transitoires peuvent en biaiser l'estimation qui repose sur une durée d'observation encore trop courte.

Les séries temporelles disponibles à ce jour suggèrent un mouvement de P077-C075 légèrement différent de ceux de P077-T077 et P077-L075. Cependant, les faibles déplacements ne peuvent pas être caractérisés et quantifiés avec fiabilité ; ils devront être confirmés et précisés lorsque les mesures seront acquises sur une plus longue durée.

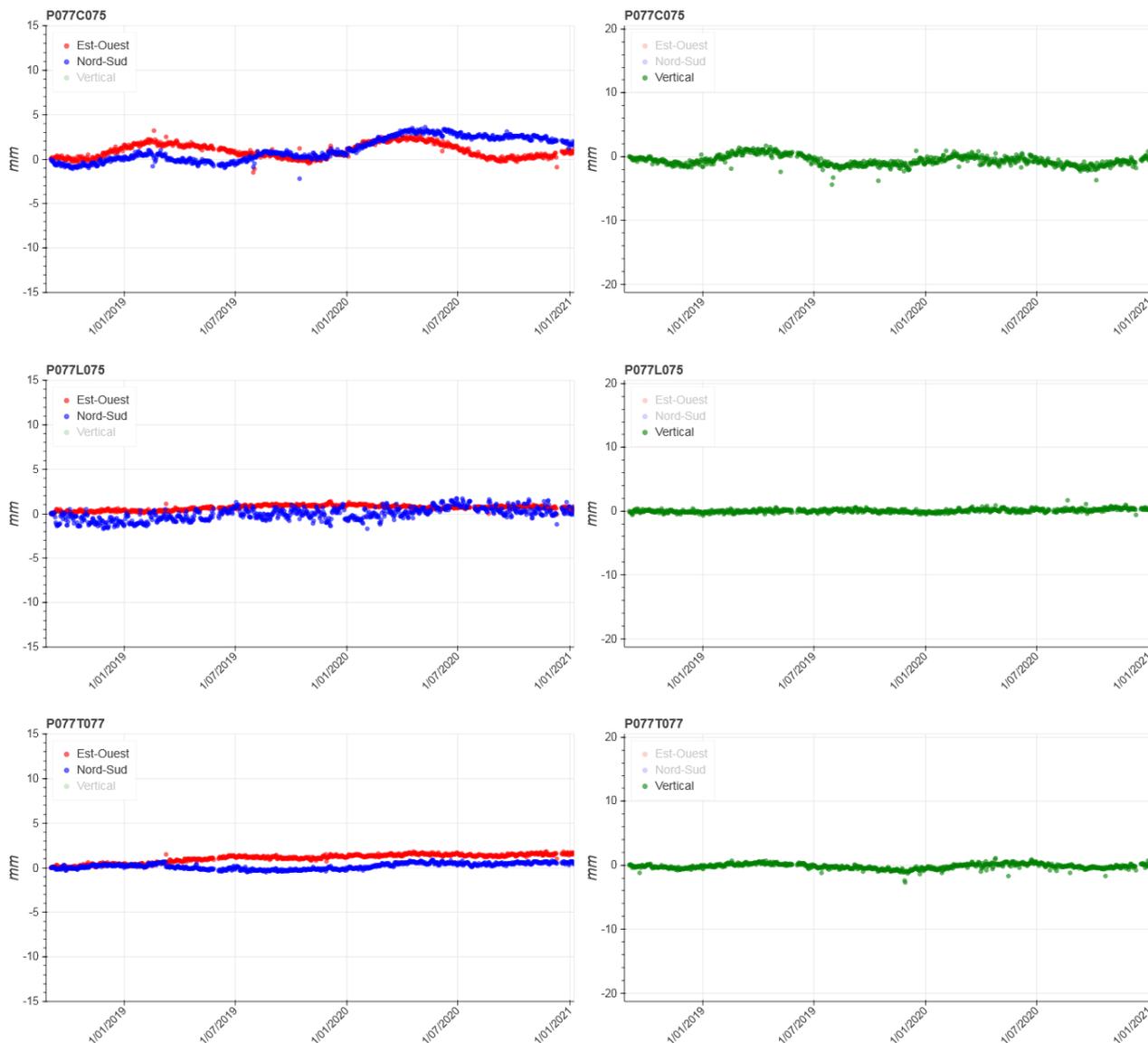


Figure 20 : A gauche composantes Est (en rouge) et Nord (en bleu), à droite composante verticale (en vert) des déplacements par rapport à la station GPS de référence P077 des stations C075, L075 et T077 de septembre 2018 à décembre 2020.

3.2.4. Synthèse des mesures de déplacements en surface

Les données du réseau GPS permanent actuel de TELSITE sont acquises sur une trop courte période pour en déduire avec fiabilité les déplacements permanents et leurs vitesses entre les stations. Les variations transitoires entravent d'autant plus leur estimation que ces déformations sont faibles. Des tendances se dégagent cependant des vingt-huit mois d'enregistrement. :

- À l'est de la zone Hélène, l'absence de mouvement quantifiable traduit la stabilité de ce secteur.
- Les mesures GPS montrent que la partie instrumentée de la zone Hélène se déplace lentement vers le nord avec une faible composante en subsidence. Ces mouvements pourraient être légèrement plus importants pour la partie la plus externe côté océan.

- Les mesures GPS de la partie occidentale de la zone Camélia confirment la poursuite d'un faible déplacement vers l'est-nord-est et d'une subsidence.
- Plus à l'ouest, aucun déplacement quantifiable ne peut être extrait avec fiabilité, un déplacement très lent vers le nord-est est suspecté en zone Gisèle, tandis que les données en zone Française sont particulièrement bruitées.

Ces tendances doivent être considérées avec précaution et devront être confirmées et, le cas échéant, précisées lorsque des mesures sur une plus longue période seront disponibles pour compenser les effets des variations saisonnières.

Les données GPS excluent l'occurrence de déformations importantes ou rapides pendant la période de mesure et indiquent que les mouvements restent faibles, en cohérence avec les observations des campagnes topographiques. Les ordres de grandeur des vitesses, lorsque des comparaisons sont possibles, sont cohérents avec les résultats obtenus avec les mesures GPS du dispositif de surveillance précédent.

3.3. Déplacements et déformations en profondeur

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, l'un à 30° et l'autre à 45° (Tableau 2 page 11 et Tableau 3 page 11). En zone Hélène, les déformations en profondeur sont par ailleurs mesurées par une chaîne d'inclinomètres implantée dans un forage vertical (Tableau 2 page 11).

3.3.1. Mesures dans les forages inclinés latéraux (FIL)

■ Dispositif de mesures dans les FIL

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

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

- la dynamique du système de mesure de déplacement : les extensomètres du système TELSITE sont adaptés aux déplacements actuels, inférieurs à 1 cm/an, vitesse faible susceptible d'induire des épisodes de grippage.

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

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

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

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

■ Déplacements en profondeur mesurés par extensométrie dans les FIL

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

- En zone Irène, depuis 2014, à l'exception d'une courte accélération à 1,4 mm/mois d'août à novembre 2017, l'évolution du FIL 5.45 était très lente avec une vitesse de quelques centièmes de mm/mois.
- En zone Camélia, au moins depuis 2012, le FIL 8.40 montrait une évolution très lente et en ralentissement continu. Un mouvement de corps rigide d'une partie du platier de ce secteur entraînant l'ensemble de la plateforme Camélia était évoqué pour interpréter ces résultats.

- En zone Française, après une période sans évolution débutée fin 2004 et suite à une intervention sur son câble en avril 2013, des déplacements ont été à nouveau observés pour le FIL 10.45. Une succession de courts hausses et paliers a conduit à une accélération globale jusqu'en novembre 2017 atteignant 2,5 mm/mois. Les mesures ont ensuite montré un net ralentissement à 0,1 mm/mois qui s'est poursuivi jusqu'en août 2018.

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

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

Le seul extensomètre du système précédent TELSITE encore en fonctionnement avant la mise en place du nouveau dispositif en 2018 est le FIL 5.45 pour lequel une vitesse du même ordre de grandeur était mesurée.

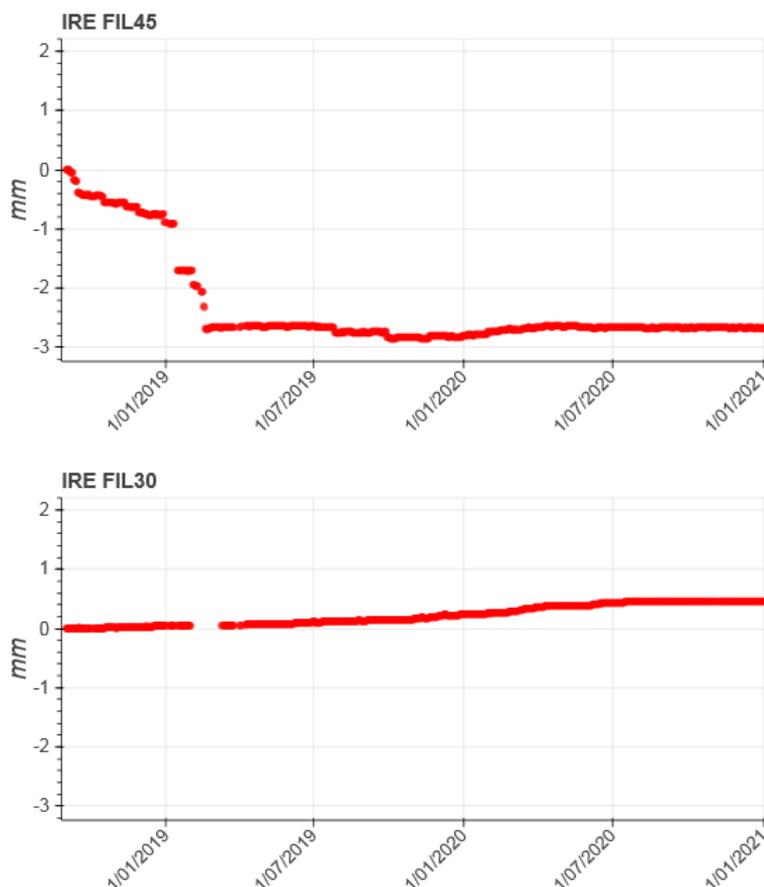


Figure 21 : Déplacements mesurés de septembre 2018 à décembre 2020 par les câbles implantés en zone Irène dans les forages inclinés de TELSITE, en haut, à 45° et, en bas, à 30°.

En zone Héléne, les données du FIL 7.45 (Figure 22) montrent sur toute la période disponible une évolution décroissante. Celle-ci tend à ralentir, mais elle se poursuit fin 2019 indiquant que le dispositif n'est pas stabilisé. En vingt-huit mois, un raccourcissement d'environ 12,5 mm a été mesuré.

L'évolution négative du FIL 7.30 (Figure 22) s'est arrêtée en février 2019. Depuis, outre un court épisode de décroissance début 2020, la courbe est globalement stable.

Deux dysfonctionnements, l'un de douze jours en janvier 2020 et l'autre de huit jours mi-décembre 2020, entraînent des lacunes dans les données des deux FIL, mais ces coupures sont trop courtes pour être clairement visibles sur les figures.

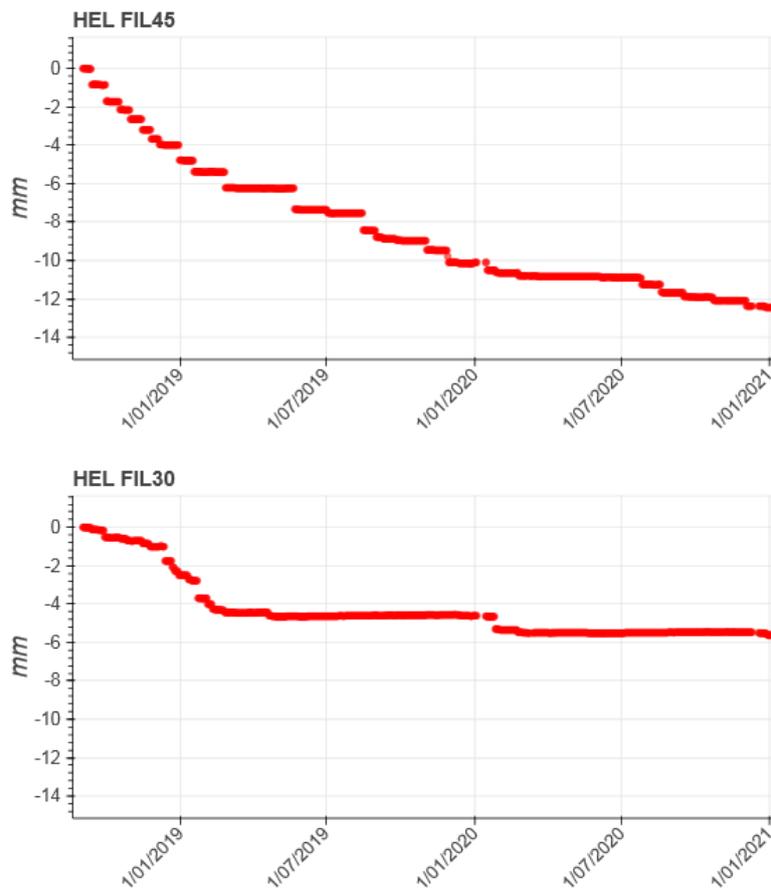


Figure 22 : Déplacements mesurés de septembre 2018 à décembre 2020 par les câbles implantés en zone Héléne dans les forages inclinés de TELSITE, en haut, à 45° et, en bas, à 30°.

En zone Française, les déplacements du FIL 10.45 (Figure 23) ont décliné au démarrage du système, cette décroissance a perduré jusque fin 2018, tandis qu'une évolution faiblement croissante a été enregistrée dès le départ par le FIL 10.30. Début 2019, une panne a généré une lacune d'environ deux mois dans les données de ce dernier. À partir de 2019, les deux extensomètres ont suivi des évolutions croissantes, globalement concordantes. Les phases mineures et très brèves d'accélération qui sont enregistrées correspondent à des vitesses n'excédant pas 0,3 mm/mois.

Les enregistrements du FIL 10.45 ont été interrompus de mi-février 2020 à mi-juillet 2020 en raison d'un dysfonctionnement du codeur. Depuis son redémarrage, les données sont à nouveau reçues et aucun

mouvement n'est détecté. Durant les six semaines avant cette panne, la vitesse moyenne est d'environ 0,2 mm/mois.

L'augmentation des déplacements du câble du FIL_10.30 a cessé au printemps 2020. Depuis, aucune évolution n'est détectée, mais des mesures cohérentes sont bien enregistrées, nous assurant du fonctionnement du dispositif.

Les deux dysfonctionnements évoqués pour les FIL en Hélène (douze jours en janvier et huit jours mi-décembre) entraînent également des lacunes dans les données en Française, mais ces coupures sont trop courtes pour être clairement visibles sur les figures.

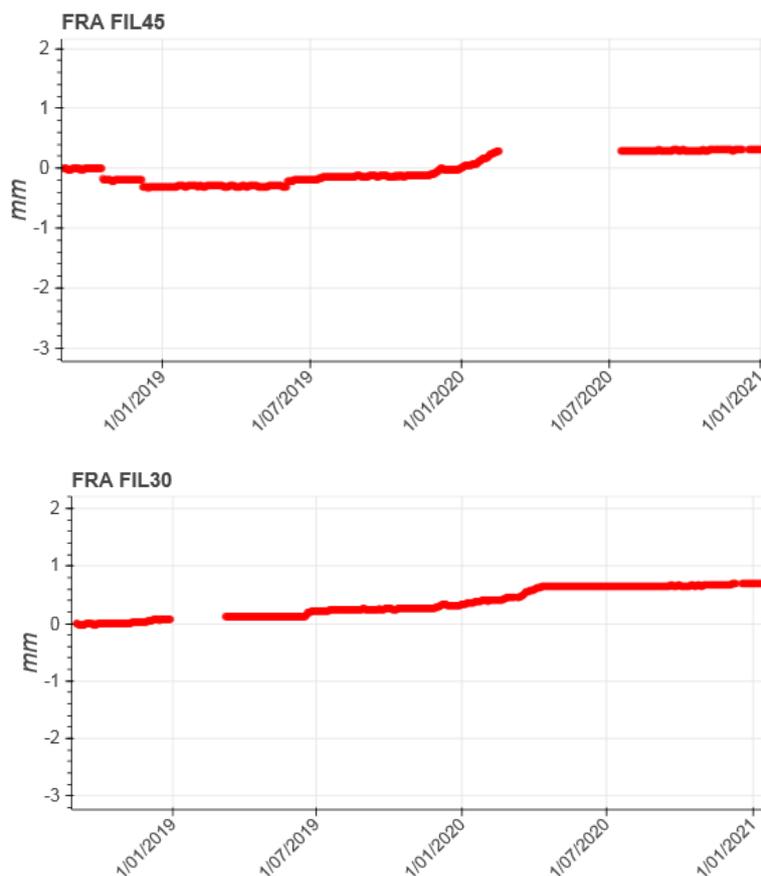


Figure 23 : Déplacements mesurés de septembre 2018 à décembre 2020 par les câbles implantés en zone Française dans les forages inclinés de TELSITE, en haut, à 45° et, en bas, à 30°.

■ Synthèse des mesures dans les FIL

Dans les trois zones équipées de FIL, les vingt-huit mois de mesures extensométriques (de septembre 2018 à décembre 2020) ne montrent pas de mouvements importants des terrains où sont ancrés leurs câbles. Les mouvements les plus rapides, détectés dans les FIL de la zone Française sur de courtes périodes, sont d'environ 0,3 mm/mois. Cette absence de mouvements significatifs en profondeur est cohérente avec les mesures acquises en 2018 dans les FIL du dispositif de surveillance précédent et avec les mesures GPS en surface.

Des phases de décroissance, correspondant à des raccourcissements, apparaissent sur les enregistrements des FIL. Ces évolutions, s'amortissant dans le temps, sont interprétées par la mise en tension des câbles. À ce jour, les mesures des FIL 7.30 et 7.45 en zone Hélène ne sont pas stabilisées, cependant leur décroissance s'atténue globalement. Même lorsque certaines d'entre elles étaient de l'ordre du mm/mois au démarrage des enregistrements, ces évolutions sont restées suffisamment lentes pour ne pas entraver les capacités de détection des extensomètres. Depuis leur mise en place opérationnelle, les FIL sont aptes à détecter des mouvements significatifs en profondeur.

3.3.2. Mesures inclinométriques

■ Dispositif de mesures inclinométriques

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

■ Déformations en profondeur mesurées par inclinométrie

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

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

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

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

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

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

Les mesures inclinométriques du système TELSITE actuel montrent, de septembre 2018 à décembre 2020, des évolutions globalement lentes au sein des différentes couches sous-jacentes de la zone Hélène (Figure 24 et Figure 25). En l'absence de variations importantes sur cette période, les enregistrements des capteurs Lily, plus sensibles que les ClinoF, sont plus appropriés pour détecter les mouvements de faible amplitude. Les courbes obtenues pour les inclinomètres Lily J, I, H, G, F, D, B et A sont présentées (certaines voies des Lily C et E ne sont plus exploitables, cf. §6.1) :

- Le **Lily J** (Figure 24), le plus superficiel, subit des variations cycliques de période annuelle et d'amplitude de l'ordre de 0,5 à 1 mdeg. Celles-ci suggèrent que les perturbations saisonnières ont un effet au moins jusqu'à la profondeur de ce capteur (48 m). La composante Est-Ouest montre une tendance globale négative, avec une vitesse moyenne sur l'ensemble de la période mesurée n'excédant pas -0,1 mdeg/mois. La composante Nord-Sud est stable.
- Les deux composantes des **Lily I et H** (Figure 24) montrent des évolutions variables au cours des seize mois d'enregistrement. Les déformations cumulées sont très faibles ; la plus forte, mesurée par la composante Nord-Sud du Lily I, est de l'ordre de -1,8 mdeg sur les 28 mois d'enregistrements, soit une inclinaison moyenne d'environ 0,06 mdeg/mois vers le sud.
- La composante Nord-Sud du **Lily G** (Figure 24) montre la seule courbe très irrégulière et globalement négative. La vitesse est d'environ 0,15 mdeg/mois vers le sud. La singularité de cette évolution conduit à considérer ces données avec prudence, la déformation apparente reste toutefois faible. La composante Est-Ouest, irrégulière dans une moindre mesure, ne montre pas d'évolution globale.
- Les courbes des **Lily F, D, B et A** (Figure 25), les plus profonds, ont des évolutions distinctes, mais plus régulières que celles des capteurs plus superficiels présentés précédemment. Seule la composante Nord-Sud du Lily B montre des oscillations périodiques de faible amplitude (de l'ordre de 0,1 mdeg) qui se superposent à de faibles variations de plus grande longueur d'onde.

Le Lily F montre une très faible inclinaison vers le nord, le Lily D vers le sud-ouest depuis mi-2019, les Lily B et A vers le sud-est. Aucun de ces inclinomètres ne montre d'évolutions notoires. Les vitesses de rotation sont en effet de l'ordre de 0,01 à 0,03 mdeg/mois au maximum.

Pour rappel, les données du Lily A ne peuvent pas être directement comparées aux mesures des inclinomètres du dispositif instrumental antérieur : la chaîne inclinométrique précédente était implantée en zone Camélia et le capteur le plus profond disponible était situé à 451 m dans une unité conglomératique au-dessus du volcanisme. L'évolution, désormais perceptible, de l'inclinaison de ce capteur est interprétée comme résultant de la subsidence naturelle du volcan au cours du déplacement de la plaque tectonique sur laquelle il est bâti.

Quatre périodes de coupure affectent les mesures inclinométriques en 2020 : la première concerne les Lily I, G et A durant douze jours début janvier, la deuxième les Lily J, H, F, D et B de fin avril à mi-mai, la troisième tous les capteurs durant huit jours mi-décembre, la dernière les Lily J, H, F, D et B durant neuf jours fin janvier. Ces interruptions correspondent à des pannes d'équipements qui ont été redémarrés ou remplacés. Les deux dysfonctionnements début janvier et mi-décembre sont ceux qui ont également touché les FIL en Hélène et Françoise.

Les très faibles mouvements détectés par les Lily de septembre 2018 à décembre 2020 ne sont pas mesurés par les ClinoF dont la sensibilité est plus faible ; ces derniers sont prévus pour détecter des déformations de plus forte amplitude.

■ Synthèse des mesures inclinométriques

Les mesures inclinométriques acquises dans le puits vertical en zone Hélène indiquent des mouvements permanents très lents, n'excédant pas à 0,15 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 3 μm /mois. Les capteurs les plus superficiels montrent les données les plus irrégulières avec, pour certaines, des variations à haute fréquence. Les évolutions des inclinomètres les plus profonds, au-delà de 300 mètres, sont beaucoup plus stables.

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

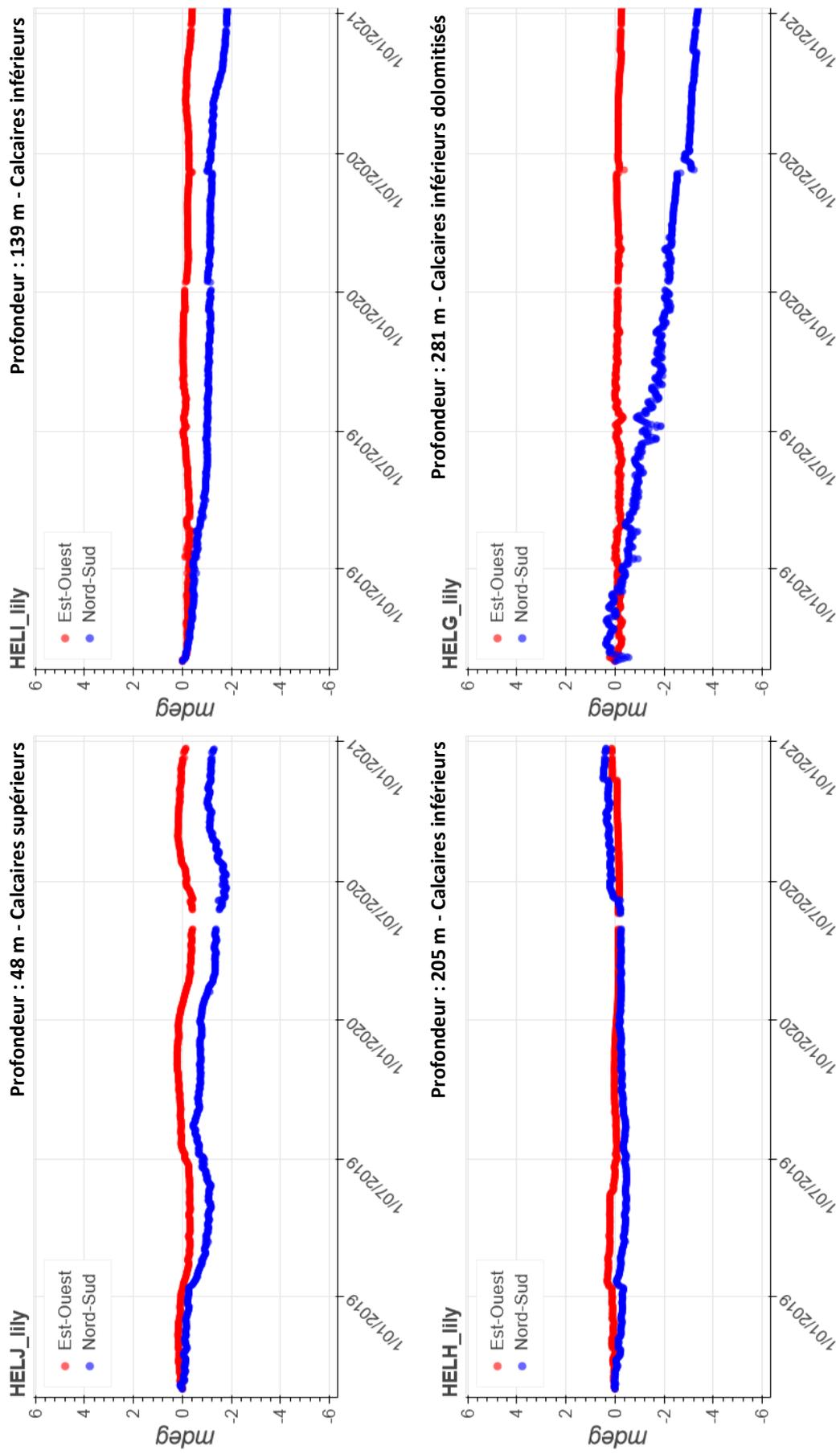


Figure 24 : Mesures de septembre 2018 à décembre 2020 des capteurs inclinométriques J, I, H et G de TELSITE, implantés en forage vertical en zone Héliène. L'échelle des ordonnées est choisie pour mettre en perspective ces évolutions par rapport à des variations de l'ordre de quelques mdeg/an au maximum correspondant à une situation normale.

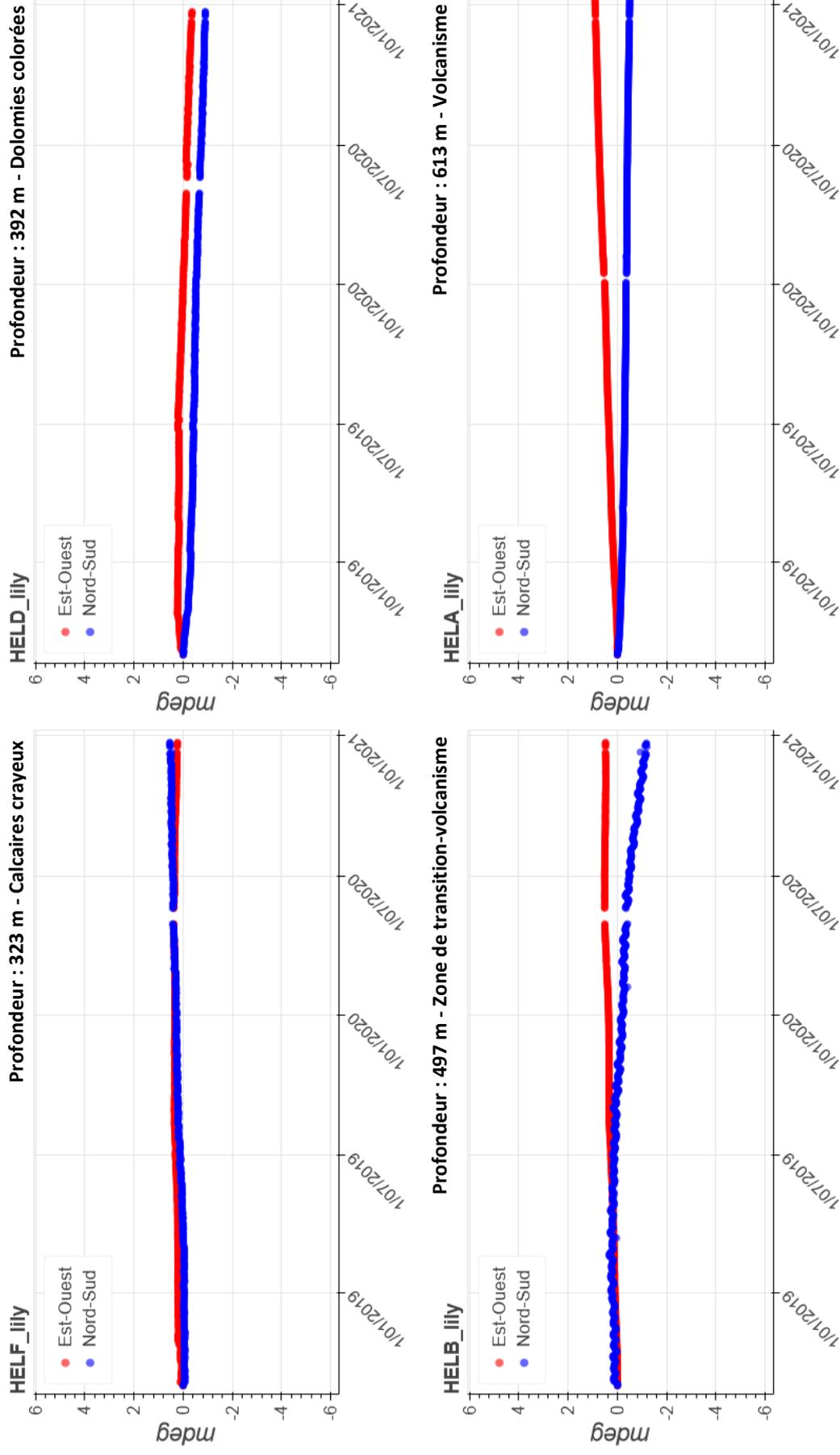


Figure 25 : Mesures de septembre 2018 à décembre 2020 des capteurs inclinométriques F, D, B et A de TELSITE, implantés en forage vertical en zone Héléne. L'échelle des ordonnées permet de mettre en perspective ces évolutions par rapport à des variations de l'ordre de quelques mdeg/an au maximum correspondant à une situation normale.

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

Une synthèse des mesures en zone Nord-Est pour 2020 est présentée dans le Tableau 6 : pour chaque indicateur (1^{ère} colonne), la vitesse moyenne sur toute l'année est estimée pour tous les enregistrements disponibles et la valeur maximale est retenue (2^{ème} colonne). Les vitesses sont discutées plus en détails dans les paragraphes précédents consacrés aux différents types de mesures. Ces valeurs sont comparées à celles observées après l'arrêt définitif des expérimentations en 1996 (3^{ème} colonne), qui elles-mêmes correspondent à celles observées dans les années précédant la reprise des expérimentations. Les valeurs au-delà desquelles un changement significatif d'évolution est attendu sont également indiquées (4^{ème} colonne).

Indicateur	Valeur en 2020	Valeur observée en 1995-1996 (à la fin des expérimentations) Niveau 0	Valeur associée à un changement d'évolution significatif (passage au niveau 1)
Sismicité : fréquence des microséismes	0,81 / semaine	< 1 / semaine	> 10 / semaine
Déplacements horizontaux*	0,1 mm / mois	< 2 mm / mois	> 20 mm / mois
Déplacements dans les forages inclinés	0,02 mm / mois	< 2 mm / mois	> 20 mm / mois
Déplacements verticaux*	0,2 mm / mois	< 1 mm / mois	> 10 mm / mois
Inclinométrie*	0,12 mdeg / mois	< 0,2 mdeg / mois	Quelques mdeg / mois

Tableau 6 : Synthèse des mesures TELSITE obtenues en zone Nord-Est en 2020 (2^{ème} colonne). Les valeurs de référence sont également reportées : celles observées à la fin des expérimentations, comme exemple du niveau 0 de l'échelle des risques (3^{ème} colonne), et celles associées à un changement significatif conduisant au passage au niveau 1 de risque (4^{ème} colonne).

*En valeur absolue.

Ces comparaisons sont illustrées sur les figures 26 à 28 en représentant simultanément, pour chaque type de mesures des déplacements, la série temporelle pour laquelle la vitesse moyenne maximale en 2020 est obtenue et les droites de pentes égales aux deux vitesses de référence (tirets 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 10.30 en zone Française sont comparées sur l'année 2020 aux vitesses de référence correspondantes, soit 2 et 20 mm/mois (Figure 26). L'évolution actuelle montre des vitesses très inférieures à celles de référence. Les quelques épisodes d'accélération sont très courts et restent très lents.

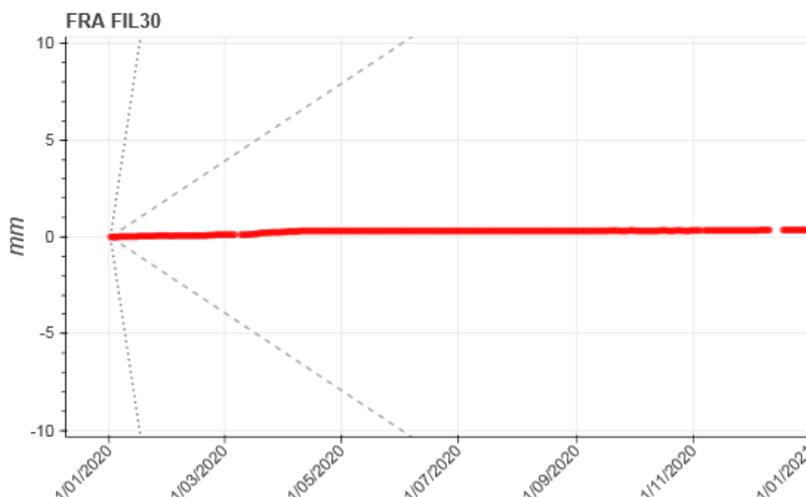


Figure 26 : Déplacements mesurés en 2020 par le câble du FIL à 30° en zone Française comparés aux vitesses de référence (lignes tiretées) définies dans le Tableau 6.

- Bien qu'étant le seul à avoir une courbe très irrégulière conduisant à considérer ses données avec prudence, le Lily G est présenté car il montre les variations les plus importantes. En 2020, celles-ci sont globalement plus lentes que la vitesse observée au moment de l'arrêt des expérimentations en 1996, i.e. $< 0,2$ mdeg/mois (Figure 27). La valeur associée au passage au niveau 1 de risque, de quelques mdeg/mois, n'est pas représentée. Seules les irrégularités à très court terme, non enregistrées par les autres Lily, peuvent conduire à des vitesses importantes.

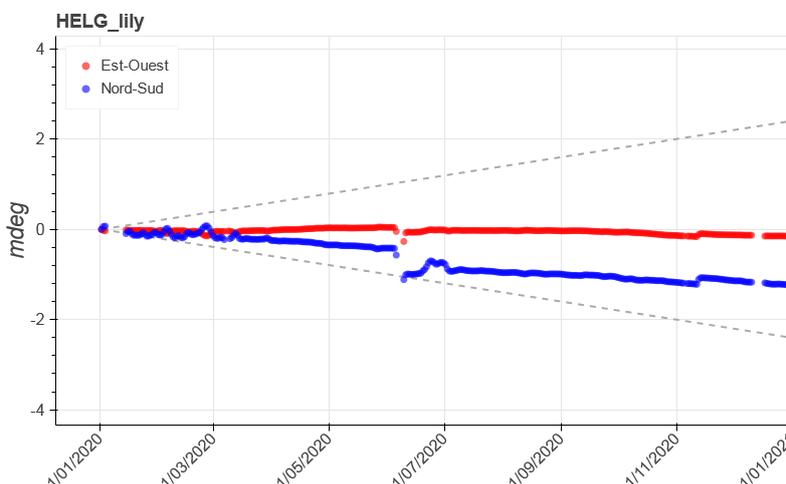


Figure 27 : Mesures en 2020 du capteur inclinométrique Lily G comparées à la vitesse (ligne tiretée) associée à la fin des expérimentations en 1996 (Tableau 6).

Comme indiqué précédemment (cf. §3.2.2), examiner les mesures GPS sur une seule année n'est pas pertinent pour distinguer les déformations permanentes des variations saisonnières. Une plus longue période est nécessaire, idéalement 4,5 ans. C'est pourquoi la comparaison aux vitesses de référence est réalisée sur la totalité de la période de mesures disponible, de septembre 2018 à décembre 2020 :

- La ligne de base J055-A083 montre les déplacements les plus importants des données GPS. Son déplacement horizontal (norme du vecteur défini par les composantes Est-Ouest et Nord-Sud) est représenté avec les droites de pente 2 et 20 mm/mois, et sa composante verticale avec les droites de pente 1 et 10 mm/mois (Figure 28). Les tendances globales des courbes de J055-A083 sont très inférieures à ces vitesses de référence définies dans le Tableau 6. Seules les variations saisonnières montrent à court terme des vitesses de déformation pouvant atteindre le même ordre de grandeur, mais ces déformations cycliques sont transitoires.

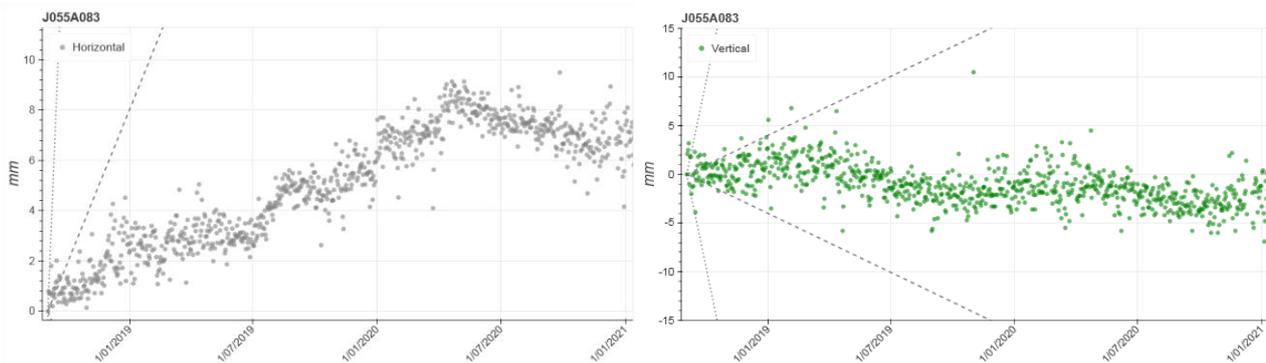


Figure 28 : A gauche, composante horizontale (norme) et à droite, composante verticale des déplacements de la station A083 par rapport à la station GPS de référence J055 de septembre 2018 à décembre 2020 comparées aux vitesses de référence (lignes tiretées) définies dans le Tableau 6.

En 2020, les indicateurs de la déformation observée (issus des mesures de sismicité, données GPS en surface, mesures d'extensomètre dans les forages inclinés latéraux et d'inclinométrie en puits) correspondent à une évolution très lente, en ralentissement depuis l'arrêt des expérimentations. Au vu de l'ensemble de ces observations l'activité géomécanique actuelle de la zone Nord-Est peut être classée au niveau zéro de l'échelle des risques (Tableau 1 page 8), correspondant à une situation normale.

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

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

- la capacité de détection est diminuée (les plus petits événements sismiques ne sortent pas du bruit de fond ou peuvent difficilement être distingués du signal généré par des vagues par exemple),
- l'incertitude sur la localisation et sur la profondeur est beaucoup plus importante (les petits relâchements de contraintes en zone Simone ne sont enregistrés que par la seule station de cette zone).

La conception du dispositif intègre ces évolutions et leurs conséquences. Le système est en mesure de détecter les événements significatifs ($M_L \geq 1,0$ par temps calme) et ses performances globales répondent aux objectifs de la surveillance.

En 2020, comme en 2019, aucun relâchement de contraintes n'a été détecté en zone Simone. La carte des événements détectés de 1980 à 2018 est présentée en annexe 2 (Figure 30, p. 55). L'historique des magnitudes (Figure 29) reste donc inchangé, aucune n'excédant 1,5 sur la période 2000-2020. Cette absence d'évènement sismique peut s'inscrire dans la continuité de la diminution de l'activité observée depuis 2017 (cinq relâchements de contraintes en 2017 et un en 2018), mais elle reflète plus probablement la diminution de la capacité de détection des plus petits événements discutée ci-dessus.

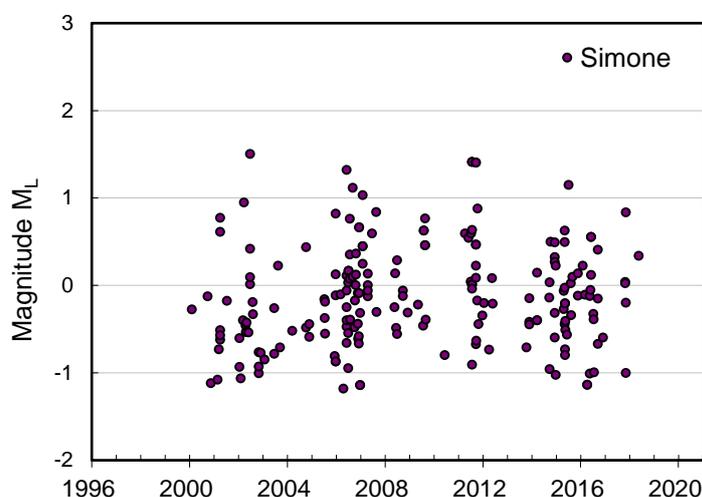


Figure 29 : Distribution temporelle des magnitudes M_L pour le secteur Sud-Est en zone Simone. Aucun évènement sismique n'a été détecté en 2019 et en 2020 (seuil de détection estimé à $M_L= 1,0$).

5. Campagne topographique 2014 : principaux résultats

Des campagnes de levés topographiques spécifiques, à une échelle plus globale que celle fournie par le réseau de télésurveillance, sont menées à Moruroa et à Fangataufa dans le cadre de prestations pilotées par le CEA/DAM. Les prochains levés sont prévus en 2021.

La dernière campagne, réalisée en 2014, s'est déroulée sur l'atoll de Moruroa du 30 avril au 5 mai et du 19 mai au 16 juin, et sur l'atoll de Fangataufa du 5 mai au 19 mai. Elle a consisté en des levés planimétriques et de nivellement, et un relevé de fracturation. L'analyse des mesures a fait l'objet d'un rapport établi par le CEA/DAM en juillet 2015. Les principaux résultats tirés de cette campagne 2014 en termes d'évolution sur la période 2007-2014 sont présentés ci-après

Pour rappel, les conclusions des campagnes antérieures en termes d'évolution pour les périodes 1996-2001 et 2001-2007 ont été reportées dans des bilans antérieurs.

5.1. Principaux résultats pour Moruroa

Sur l'atoll de Moruroa, les résultats issus de la campagne topographique 2014 en termes de déplacements horizontaux et de mouvements verticaux sont en accord avec les données de surface mesurées en continu par le système TELSITE.

L'évolution entre 2007 et 2014 montre que les déplacements annuels moyennés sur cette période restent faibles :

- En zone externe de l'atoll, les déplacements moyens horizontaux calculés sur la période 2007-2014 sont équivalents à ceux de la période précédente (2001-2007). Pour la partie interne située sur le platier, ils sont en légère réduction.
- Les déplacements horizontaux maximaux, pour chaque type de mesure, présentent, en moyenne sur la période 2007-2014, des vitesses inférieures à 7 mm/an (zone Nord).
- Les résultats de nivellement indiquent un ralentissement significatif entre les deux périodes tant pour les déplacements mesurés sur la route (zone interne) que ceux mesurés sur les digues (zone externe).
- Pour la période 2007-2014, la subsidence maximale de 5 mm/an est mesurée en zone externe.
- Comme par le passé, les mouvements de surface les plus importants, mesurés tant en planimétrie qu'en nivellement, sont localisés au centre de la zone Camélia.
- Les mouvements de surface sont minimes à la périphérie de la zone Camélia confirmant ainsi l'absence de modification des enveloppes de glissement.
- Les mesures de planimétrie en zone Sud ne montrent pas d'évolution significative. Elles restent très faibles en nivellement (-1 mm/an).

Ces informations confortent les prévisions d'un ralentissement global progressif des déplacements en surface au centre de la zone Camélia.

5.2. Principaux résultats pour Fangataufa

A Fangataufa, les mesures topographiques sont conformes aux prévisions de ralentissement très net de l'évolution après 1996, notamment dans les zones Nord et Nord-Est. Elles ne révèlent pas d'évolution significative du platier depuis la période 2001-2007 dans la limite de la précision des mesures.

5.3. Interprétation pour la zone Nord-Est de Moruroa

Les résultats d'évolution, déduits de l'ensemble des mesures du système continu TELSITE et de la campagne topographique 2014, sont compatibles avec l'interprétation suivante :

- Les zones Française, Camélia et Irène présentent des mouvements lents en profondeur. Jusqu'à fin 2004, avant le blocage du FIL 10.45, les mesures indiquaient les vitesses de déplacements en profondeur les plus notables dans la zone Française.

- En surface, c'est en zone Camélia que les mouvements sont les plus notables, et touchent la partie émergée. Le mécanisme global en profondeur interagit avec des mouvements plus superficiels de blocs rocheux.
- En zone Irène, le mouvement intéresse une partie immergée des masses carbonatées situées au-delà de la limite marquée par les fractures sous-marines, c'est-à-dire en domaine externe.

6. Fonctionnement du système TELSITE en 2020

6.1. Disponibilités des mesures

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

- pour les capteurs sismiques impliqués dans l'alerte : 97,8%.

Ce taux résulte d'une panne d'acquisition au mois de janvier en zone Hélène et d'une panne de communication en décembre touchant les zones Hélène et Françoise. Ce dernier dysfonctionnement a duré huit jours, délai nécessaire pour mettre en place l'intervention sur site. Durant cette période, seules quatre stations étaient opérationnelles, dont une seule en zone Nord, alors que le fonctionnement nominal du système d'alerte à 90 secondes requiert cinq stations, dont deux en zone Nord. Ainsi, en attendant le remplacement du matériel défectueux, le système d'alerte et de surveillance a fonctionné en mode dégradé, le personnel sur site a été cantonné en Zone Vie, protégée par les murs anti-tsunami ;

- pour les capteurs sismiques complémentaires : 97,4%.

Ce taux reflète les deux pannes citées précédemment ;

- pour les capteurs GPS : 92,6%.

Le principal déficit est lié à l'arrêt de la station H049 depuis le 6 juin 2020, une tempête ayant arraché son antenne. Celle-ci n'a pas pu être remplacée avant la mission de maintenance qui a eu lieu en janvier-février 2021 en raison de la crise sanitaire de la Covid-19. En omettant H049, le taux de disponibilité, de 98,1%, résulte de la panne de décembre déjà citée ;

- pour les extensomètres : 90,0%.

Les principales anomalies sont liées aux deux pannes évoquées précédemment, touchant les FIL en Hélène en janvier et ceux en Hélène et Françoise en décembre, et à une coupure d'acquisition du FIL 10.45 en zone Françoise de mi-février à mi-juillet 2020 ;

- pour les inclinomètres en puits : 87,2%.

En omettant les voies Est-Ouest du Lily C et Nord-Sud du Lily E pour lesquelles les signaux ne sont plus exploitables⁵, le taux de disponibilité est de 91,8%. Ce taux reflète, outre les deux dysfonctionnements cités précédemment en janvier et en décembre, deux autres de communication de fin avril à mi-mai et fin décembre. Parmi ces quatre pannes, trois ont touché la moitié des capteurs, une, en décembre, la totalité ;

- pour les marégraphes : 70,0%.

Ce taux reflète une coupure du capteur en Hélène de fin avril à mi-mai et l'arrêt de ceux en Kilo depuis début mars, en Dindon depuis fin mai, et en Irène depuis fin juin. Non essentiels à la surveillance et non nécessaires à l'alerte, le dépannage de ces capteurs a été différé. Il a eu lieu lors de la mission de maintenance qui a été reportée en janvier-février 2021.

6.2. Faits marquants et actions de maintenance

En 2020, une mission de maintenance du système TELSITE s'est déroulée du 3 au 25 février. Les principales actions de maintenance curative ont permis le remplacement des matériels suivants :

- pour les capteurs : capteurs sismiques de surface 3ESP en Denise (5 février) et en Gisèle (15 février),
- pour les chaînes d'acquisition : interface du sismomètre 3ESP en Hélène (6 février),
- pour les télécommunications : switchs des baies TELECOM Hélène FIL2 (4 février) et Hélène GEO (14 février),
- pour l'alimentation : un connecteur de la centrale solaire du GPS K107 (6 février).

Les actions de maintenance préventive suivantes ont également été menées :

- test des capteurs de secours des puits Hélène, Françoise et Irène (5 et 6 février),
- purge de l'ensemble des données de 2017 et 2018 du cluster de données (6 février),
- mise en place d'une liaison fibre optique terrestre (et de sa supervision) et d'une liaison Internet entre Anémone et le bureau CEA en Martine (3 au 25 février),
- mise en œuvre et test du poste opérateur de supervision (3 au 25 février),
- contrôle de l'ensemble des centrales solaires et des systèmes de distribution associés (du 14 au 20 février).

En dehors de la mission de maintenance, des interventions de dépannage ont permis les actions suivantes :

- pour les chaînes d'acquisition : remplacement de l'interface codeur du FIL 30 Hélène (13 mars) et redémarrage de l'interface codeur du FIL 10.45 Françoise (13 juillet),

⁵ Le retour d'expérience sur la fragilité de ce type de capteur au moment de leur installation a incité à prévoir une large redondance de cette technologie dans la conception du deuxième dispositif du système TELSITE. Grâce à cette anticipation, la mesure d'inclinométrie reste disponible à toutes les profondeurs.

- pour les télécommunications : remplacement des switchs des baies TELECOM Hélène GEO (18 mai), Jeanne (13 juillet), Dindon (24 novembre), Denise et Hélène FIL1 (17 décembre).

Au cours de l'année 2020, les pannes de plusieurs équipements réseau (switchs) des baies TELECOM ont nécessité leur remplacement. Tous les équipements réseau du système étant issus de la même série, ils ont tous, y compris ceux de secours, été remplacés par des équipements d'une autre série lors de la mission de maintenance en janvier-février 2021.

6.3. Bilan du fonctionnement de TELSITE pour l'année 2020

Le dispositif automatique d'alerte, dit à 90 secondes, du système TELSITE a été opérationnel durant toute l'année 2020. En raison du dysfonctionnement d'équipements réseau au nord de l'atoll, le système a fonctionné en mode dégradé (avec quatre stations opérationnelles sur six) pendant huit jours consécutifs en décembre 2020, impliquant le cantonnement du personnel en Zone Vie.

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

La redondance des capteurs a permis d'assurer les suivis de la microsismicité, en dehors des huit jours de panne en décembre, et de l'évolution géomécanique de manière régulière tout au long de l'année.

7. Conclusion générale

Le bilan de la surveillance géomécanique de Moruroa repose, pour l'année 2020, sur les mesures du système de télésurveillance TELSITE, opérationnel depuis septembre 2018. Il a permis d'assurer un suivi continu sur toute l'année et répond aux objectifs de la surveillance de l'atoll.

Le système automatique d'alerte dit à 90 secondes a été opérationnel durant toute l'année 2020, seule une panne d'équipements réseau a impliqué un fonctionnement en mode dégradé pendant huit jours consécutifs en décembre.

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 références observées juste après la dernière campagne d'expérimentations de 1996, indique une faible évolution géomécanique de Moruroa (zones Nord-Est et Sud-Est). Le suivi des campagnes topographiques de 2001, 2007 et 2014 met également en évidence une faible évolution géomécanique de Fangataufa.

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

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

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

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

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

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

avec M_L la magnitude locale.

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

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

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

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

Bibliographie

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

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

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

ANNEXE 2 – Historique de la microsismicité de 1980 à 2018 en zone Simone

En zone Simone, lors de la conception du dispositif actuel du système TELSITE, les priorités identifiées ont conduit à ne pas conserver de station sismique en profondeur telle qu'en disposait le système précédent, mais à implanter uniquement une station de surface.

Cette modification instrumentale, dont l'impact avait été pris en compte, n'altère pas les capacités du système à détecter les évènements significatifs en zone Simone et à répondre ainsi aux objectifs de la surveillance. Cependant, elle implique une diminution en termes de capacités de détection pour ce secteur Sud-Est. D'autre part, les évènements détectés au sein de la zone Simone ne peuvent pas être localisés avec une précision équivalente à celle du système de surveillance précédent. En l'absence de nouveaux évènements sismiques détectés en 2019, la carte des évènements microsismiques de la zone Simone reste inchangée et identique à celle associée à la période 1980 – 2018 (Figure 30).

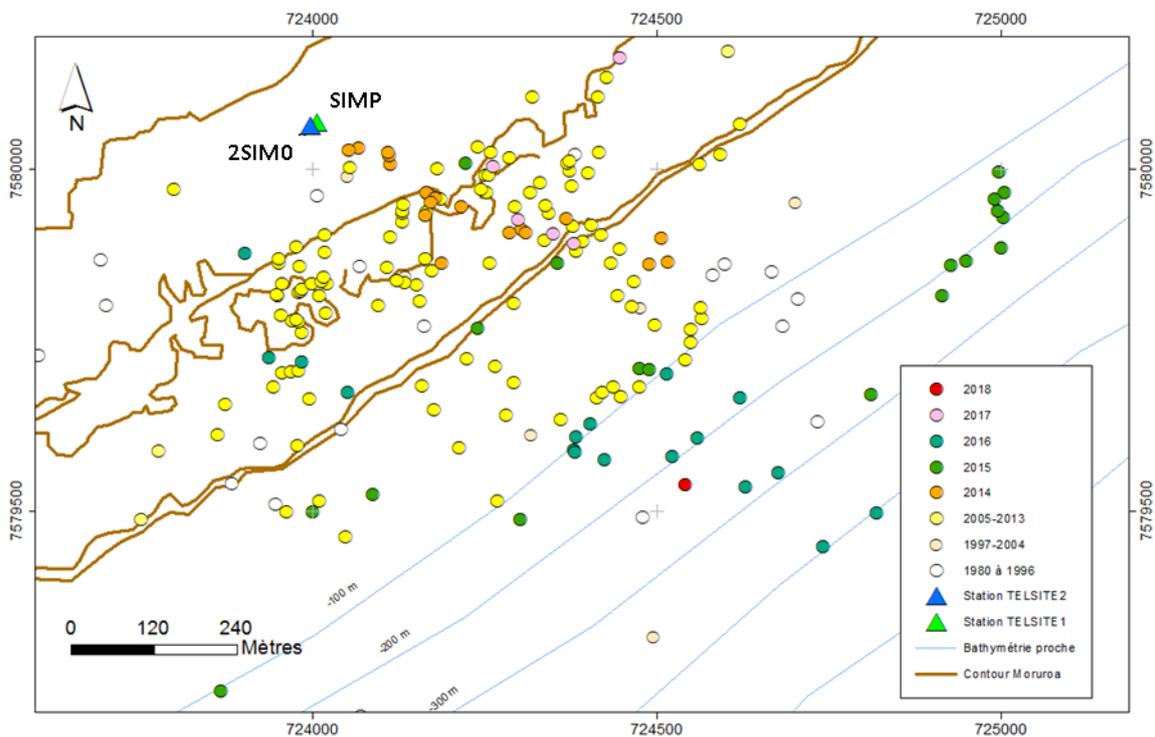


Figure 30 : Carte des événements microsismiques localisés de 1980 à 2018 en zone Sud-Est (localisation exhaustive depuis décembre 2005 des événements d'amplitude suffisante pour être localisés). Le triangle bleu représente la station de surface actuellement opérationnelle (2SIMO : TELSITE 2) et le triangle vert l'ancienne station en profondeur (SIMP : TELSITE 1). Les contours bruns délimitent l'estran.

ANNEXE 3 – Détection d'un éboulement le 17 avril 2020 au nord de Moruroa

Le 17 avril 2020 à 00h15 TU, le système TELSITE a détecté un évènement qui s'apparente, au vu des signaux enregistrés, à un petit éboulement sous-marin en zone Nord.

■ Signaux enregistrés

Cet évènement a été enregistré sur toute la zone Nord-Est, depuis Denise jusqu'à Irène. À l'est de Gisèle, il n'est visible que sur les stations en puits (en Hélène et en Irène), les signaux en surface étant trop faibles par rapport au bruit de fond. Il n'est pas non plus visible sur les stations en zone Sud, ni sur celles du réseau sismique polynésien composé d'une dizaine de stations réparties parmi les archipels de la Polynésie française. Aucun signal relatif à une éventuelle vague n'a été enregistré par les autres marégraphes de la zone Nord ; cependant, celui situé le long de la digue Kilo ne fonctionnait pas à cette période.

Les signaux de cet évènement ne correspondent clairement ni à un relâchement de contraintes ni à un séisme local. Des signaux comparables avaient été enregistrés le 1^{er} juillet 2005 à Rangiroa, mais aussi le 5 décembre 2000 à Papeete où l'occurrence d'un glissement de terrain sous-marin avait alors été confirmée dans le port. Les signaux se caractérisent par une première partie courte (quelques secondes) et énergétique, et une seconde longue (six à huit minutes) et d'amplitude beaucoup plus faible (Figure 31 et Figure 32). Un signal similaire beaucoup plus faible est visible une minute plus tôt sur les stations Edith en surface et Françoise en puits.

Les enregistrements conduisent ainsi à interpréter cet évènement comme un éboulement : ils résultent probablement d'une chute brusque de blocs suivie d'un glissement lent et long des éboulis sur la pente de l'atoll.

■ Localisation en zone Nord

Il n'est pas possible de localiser précisément cet éboulement car, contrairement aux évènements sismiques, les signaux enregistrés ne présentent pas de phases sismiques claires. Cependant, la station Denise est la première à enregistrer l'évènement et c'est sur la station Edith que le signal vertical est le plus fort avec une amplitude maximale zero-crête d'environ 1,8 $\mu\text{m/s}$ (Figure 32). Ainsi, l'éboulement doit prendre sa source au large des zones Denise et Edith. De plus, l'onde sismique arrive quasiment simultanément sur Edith et sur la station en puits de Françoise, ce qui confirme une origine de l'éboulement sur les flancs de l'atoll, là où les pentes sont favorables à un tel phénomène.

Ce type d'évènement a déjà été enregistré par le passé par le système TELSITE, notamment en 2006 en zone Camélia et en 2008 en zone Françoise avec des amplitudes similaires de l'ordre de quelques $\mu\text{m/s}$.

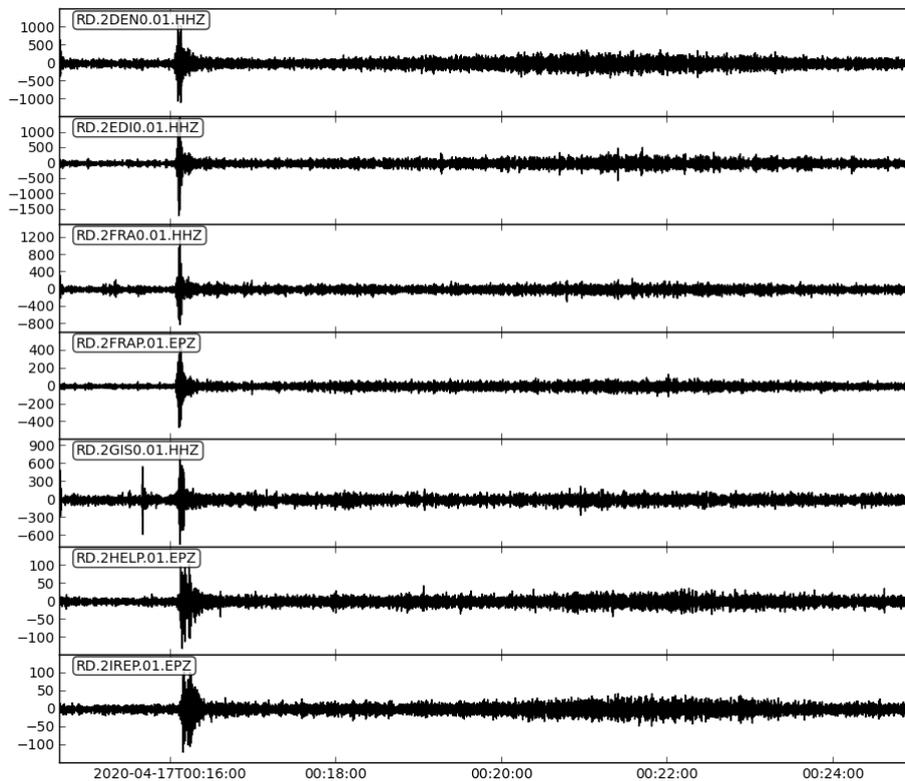


Figure 31 : Signaux, filtrés entre 3 et 8 Hz, de la composante verticale des stations de la zone Nord-Est qui ont enregistré l'éboulement du 17/04/2020. L'amplitude est en nm/s.

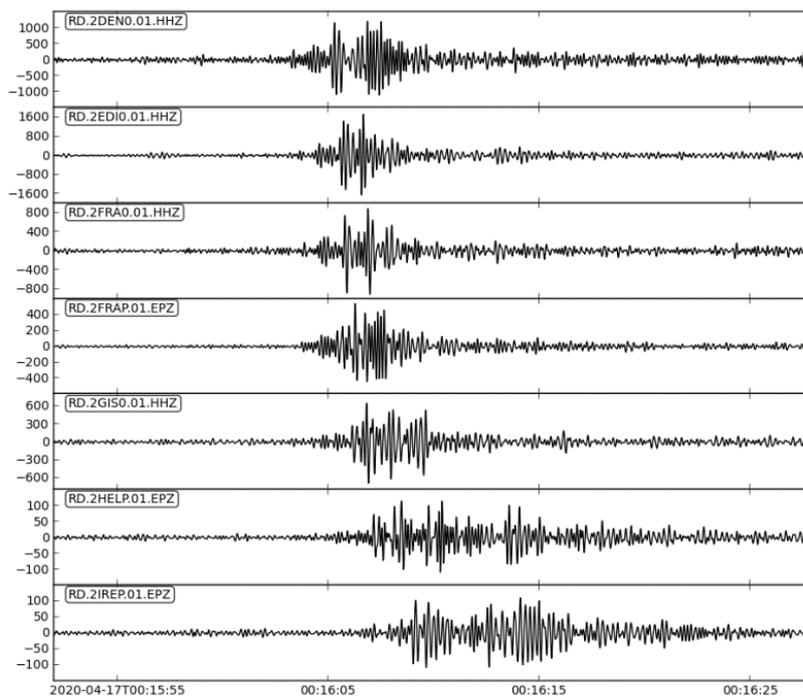


Figure 32 : Zoom sur la première partie des signaux, filtrés entre 3 et 8 Hz, de la composante verticale des stations de la zone nord-est qui ont enregistré l'éboulement du 17/04/2020. L'amplitude est en nm/s.

