

Rapport annuel 2022

Observatoire volcanologique et sismologique de Martinique - IPGP





Rapport annuel 2022

Observatoire volcanologique et sismologique de Martinique - IPGP

Sommaire

Présentation de l'observatoire	4
Personnels	4
> à l'observatoire en Martinique	4
> à Paris (équipe de direction des Observatoires volcanologiques et sismologiques)	5
Résumé	5
Activité de la Montagne Pelée	5
Communication	6
Activité sismique régionale	6
Instrumentation	7
Personnel	7
Divers	7
Introduction	7
Activité de la Montagne Pelée	9
Introduction	9
Activité sismique	9
Phénoménologie	15
Zone de végétation dégradée	15
Dégazage en mer	17
Déformation du sol	19
GNSS Permanents et de répétition	19
Inclinométrie	22
Suivi géochimiques des sources thermales de la Montagne Pelée et de la rivière du Prêcheur	25
Forage de Puits Chaud continu	25
Forages des carrières FCR1 et FCR2	26
Rivière du Prêcheur	26
Sources chaudes et rivière Chaude	27
Forage du Prêcheur	28
Bilan des mesures géochimiques du dégazage de la Montagne Pelée	29
Glissements de terrain et lahars	30
Glissements de terrain	30
Lahars	31
Activité volcanique de l'arc des Petites Antilles	31
Activité locale et régionale	32
Contexte tectonique	32
Activité sismo-tectonique	34
Sismicité ressentie	37
Déformation régionale	39
Réseaux de surveillance et d'études	40
Le réseau sismologique régional	40
Le réseau sismologique de Martinique	42
Les réseaux accélérométriques de Martinique	43
Le réseau de suivi des déformations	43
Réseau GNSS	44
Inclinométrie	45
Le système de détection automatique des lahars de la rivière du Prêcheur	46



Rapport annuel 2022

Observatoire volcanologique et sismologique de Martinique - IPGP

Le réseau de suivi géochimique de la Montagne Pelée	47
Interventions sur les réseaux en 2022	48
Interventions sur le réseau sismologique régional	48
Interventions sur le réseau sismologique de Martinique	49
Interventions sur les réseaux accélérométriques de Martinique	49
Interventions sur le réseau de suivi des déformations	50
Interventions sur le système de détection automatique des lahars de la rivière du Prêcheur	50
Site d'observation de la falaise Samperre au Prêcheur	51
Stations Météorologiques	51
Interventions sur le réseau de suivi géochimique de la Montagne Pelée	51
Autres Interventions	51
Evolution du système informatique en 2022	51
Archivage et distribution des données	52
Activités diverses de l'OVSM	53
Formations, missionnaires et stagiaires	53
Formations	53
Missionnaires	53
Stagiaires	53
Hygiène et sécurité	54
Bâtiments	54
Electricité	54
Climatisation	55
Véhicules	55
Relations avec les autorités	55
Participation à l'exercice "Pelée 22" de la Préfecture en novembre et décembre 2022	55
Vulgarisations, Conférences et médias	57
Projets et collaborations	59
Projet PREST	59
WP1 : Colloque PREST	59
WP4 : Surveillance et fonctionnement des systèmes volcaniques	60
WP5 : Plateforme Marine	62
WP7 : Instrumentation sous-marine en temps réel	64
Publications PREST en 2022	65
Réseau temporaire de nodes	66
Travaux de recherche en cours	68
Analyse spatio-temporelle de la sismicité ressentie en Martinique	68
Mécanismes au foyer des séismes volcano-tectoniques de la Montagne Pelée	70
Projets ANR	70
Références	72
Annexe	74



Rapport annuel 2022

Observatoire volcanologique et sismologique de Martinique - IPGP

Présentation de l'observatoire

Observatoire volcanologique et sismologique de Martinique – IPGP
Lieu dit Blondel, Morne la Rosette, Route de l'observatoire, 97250 Saint Pierre, Martinique

www.ipgp.fr/fr/ovsm/actualites-communiques-publics-de-lovsm

twitter : [@ObsMartinique](https://twitter.com/ObsMartinique) - facebook : [ObsVolcanoSismoMartinique](https://www.facebook.com/ObsVolcanoSismoMartinique) - youtube : [Chaîne IPGP](https://www.youtube.com/ChaîneIPGP)

Couverture

Photo prise par le D972 lors d'un survol du bâtiment de l'OVSM IPGP, 2022.

Citation de ce rapport

G. Carazzo, J. Corbeau, F. Beauducel, J.-B. de Chabalier et l'équipe de l'OVSM-IPGP, Rapport d'activité 2022 de l'Observatoire volcanologique et sismologique de Martinique, Institut de Physique du Globe de Paris, mars 2023.

Remerciements

Nous tenons à remercier la Collectivité Territoriale de Martinique, le Service Interministériel Départemental de la Protection Civile (Préfecture de la Région Martinique) et l'État Major de Zone Antilles pour son soutien logistique en nous permettant l'utilisation de l'hélicoptère de la Sécurité Civile, le Service territorial d'incendie et Secours, le Parc Naturel Marin de Martinique pour le soutien logistique sur le terrain, la Mairie du Prêcheur, le Centre National de la Recherche Scientifique, l'Institut National des Sciences de l'Univers (SNOV), le Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche et le Ministère de la Transition Écologique, le projet Européen PREST "Vers la Plateforme Régionale de Surveillance Tellurique du futur" (Interreg Caraïbe V) et le projet Européen EUROVOLC (No. 731070) pour leur soutien financier.

Personnels

> à l'observatoire en Martinique

Prénom NOM	Fonction
Fabrice Fontaine	Directeur et Responsable Scientifique - Géophysique (<i>départ 01/09/2022</i>) (CDD)
Jean-Bernard de Chabalier	Directeur et Responsable Scientifique Intérimaire - Géophysique (<i>de 09/2022 à 12/2022</i>)
Jordane Corbeau	Directrice adjointe - Géophysique
Samantha Phemius	Technicienne - Gestionnaire Comptable et Financière
Alice Jalta	Assistante Ingénieure - Manager du projet PREST (CDD)
Julien Koziol	Ingénieur d'étude - Plateforme marine du projet PREST (<i>départ 01/07/2022</i>) (CDD)
Anthony Potier	Ingénieur d'étude - Plateforme marine du projet PREST (<i>arrivée 20/06/2022</i>) (CDD)
Arnaud Andrieu	Ingénieur d'étude - Réseau temporaire de nodes (<i>arrivée 01/09/2022</i>) (CDD)



Rapport annuel 2022

Observatoire volcanologique et sismologique de Martinique - IPGP

Cyril Vidal	Ingénieur d'étude - Responsable Informatique, Système-Réseau, Bâtiment
Jean-Marc Lavenaire	Technicien Informatique - Administration et réseau
Doris Vatou	Responsable Technique (<i>départ le 01/09/2022</i>) (CDD)
Frédéric Jadelus	Technicien - Instrumentation et mesures, Géochimie
David Melezan	Technicien - Instrumentation et mesures, Assistant de prévention
Jean-Gilles Gabriel	Adjoint technique - Entretien espaces verts et instruments
Valérie Minin	Adjointe Technique - Entretien bâtiment, accueil, hébergement

> à Paris (équipe de direction)

Prénom NOM	Fonction
Marc Chaussidon	Directeur
Antoine Charlot	Directeur général des services
Anne Le Friant	Directrice adjointe en charge des observatoires
Arnaud Lemarchand	Directeur adjoint instrumentation
Jean-Christophe Komorowski	Responsable scientifique des observatoires volcanologiques et sismologiques
Jean-Marie Saurel	Responsable opérationnel des observatoires volcanologiques et sismologiques

En complément du personnel présent en Martinique et de l'équipe de direction à Paris, l'OVSM-IPGP s'appuie sur de nombreux collègues rattachés au SNOV pour l'analyse et l'interprétation des données acquises quotidiennement par l'observatoire.

Résumé

Activité de la Montagne Pelée

La Montagne Pelée est un volcan actif de type explosif ayant connu de nombreuses éruptions magmatiques et phréatiques par le passé. Depuis la fin de la dernière éruption magmatique en 1932, qui a été associée à la mise en place d'un dôme de lave, son activité a décliné de manière significative jusqu'à l'arrêt de l'activité fumerollienne depuis 1970 et une activité sismique globalement très faible.

Depuis décembre 2018, l'activité sismique est passée au-dessus de son niveau de base établi à partir des observations instrumentales continues des années précédentes. Cette nouvelle activité se caractérise à la fois par de nombreux séismes superficiels de faible énergie, par quelques rares séismes profonds (localisés à environ 10-20 km de profondeur sous l'édifice



Rapport annuel 2022

Observatoire volcanologique et sismologique de Martinique - IPGP

volcanique) et par l'apparition de signaux sismiques de type trémor et longue période, témoignant de mouvements de fluides en surpression dans le système hydromagmatique interne. Au cours de l'année 2022, l'OVSM-IPGP a détecté au moins **628 séismes de type volcano-tectonique (VT)**. Ces séismes, de magnitude inférieure ou égale à 1,9, n'ont pas été ressentis par la population. L'énergie libérée cumulée de l'ensemble de ces séismes VT en 2022 est de **38 MJ**. Pour rappel l'OVSM avait enregistré 2539 séismes VT et une énergie libérée cumulée de l'ensemble de ces séismes de 248 MJ en 2021.

Une zone de végétation dégradée située sur le flanc sud-ouest de la Montagne Pelée est observée sur les images satellitales depuis fin décembre 2019 et confirmée visuellement depuis le mois de décembre 2020. Une zone de dégazage en mer (présence de bulles de gaz à faible température) située au nord de Saint-Pierre a été signalée à l'observatoire en juin 2021. En partenariat avec le Parc Naturel Marin de Martinique, l'OVSM-IPGP y réalise des prélèvements et analyses périodiques afin de suivre l'évolution de ce phénomène en relation éventuelle avec l'activité du volcan. Depuis juin 2022, les déformations de l'édifice mesurées par le réseau de capteurs GNSS indiquent un faible gonflement sur le long terme pouvant être interprété par une source superficielle de légère pressurisation localisée sous la partie sommitale de la Montagne Pelée. Cette source pourrait être engendrée par la remontée de volumes limités de fluides hydrothermaux et/ou magmatiques (gaz, eaux hydrothermales) dans l'édifice volcanique. L'ensemble de ces observations reflète une réactivation du système volcanique.

Cependant, l'énergie sismique libérée par l'ensemble des séismes superficiels est faible et aucun séisme d'origine volcanique n'a été ressenti par la population. La température et l'acidité (pH) des sources thermales de l'édifice ne montrent aucune augmentation significative. Les déformations de l'édifice sont très faibles et stables sur le court terme. Rappelons que lors des phases de réactivation volcanique, des périodes de plus forte activité, sismique notamment, alternent souvent avec des phases d'activité plus réduite.

La probabilité d'une activité éruptive à court terme reste faible. Cependant, compte tenu de l'ensemble des observations collectées depuis fin 2018 et de leur nature, et sur la base des observations de l'OVSM-IPGP enregistrées au cours de l'année 2022 et résumées dans ce rapport, nous ne pouvons exclure une évolution de la situation à moyen terme. En accord avec les dispositions prévues par les autorités, le niveau d'alerte reste : **JAUNE = Vigilance**.

Activité globale observée	Minimale Niveau de base	En augmentation Variations de quelques paramètres	Fortement augmentée Variations de nombreux paramètres, sismicité fréquemment ressentie	Maximale Sismicité volcanique intense, déformations majeures, explosions
Délais possibles	Siècle(s) / Années	Année(s) / Mois	Mois / Semaines	Imminente / En cours
Décision	← OVSM-IPGP		← Préfecture →	
Niveaux d'alerte	VERT = Pas d'alerte	JAUNE = Vigilance	ORANGE = Pré alerte	ROUGE = Alerte

Communication

Conformément aux bonnes pratiques des observatoires volcanologiques nationaux et internationaux et notamment compte tenu de l'activité sismique soutenue, l'OVSM-IPGP publie depuis le 15 décembre 2020 un **bilan hebdomadaire public** succinct de l'activité de la Montagne Pelée en plus de son bulletin mensuel détaillé et de son rapport annuel. Ces différentes informations sont reprises sur les réseaux sociaux de l'OVSM (Facebook et Twitter). L'objectif est de pouvoir apporter une information synthétique et accessible plus fréquente sur l'état d'activité du volcan tant que l'activité le demande et, notamment, en phase de vigilance jaune.

Activité sismique régionale

Concernant l'activité sismique régionale, **985** séismes d'origine tectonique ont été enregistrés en 2022, parmi lesquels **8 séismes ont été ressentis** en Martinique tandis que 5 séismes l'avaient été en 2021. Le séisme le plus fortement ressenti en Martinique



Rapport annuel 2022

Observatoire volcanologique et sismologique de Martinique - IPGP

en 2022 (intensité maximale IV, magnitude 4.8) s'est produit le 16 juillet 2022 à 20h11 locales à l'est-nord-est de Trinité et à environ 51 km de profondeur.

Instrumentation

Une nouvelle station numérique large-bande à 3 composantes est venue compléter le réseau sismologique de la Montagne Pelée qui avait été largement modernisé en 2021. Le réseau de stations du suivi des déformations a lui aussi été enrichi d'une nouvelle station GNSS. Les interventions de contrôle préventif, de maintenance, et d'entretien ont été effectuées tout au cours de l'année afin d'assurer le bon fonctionnement des différents réseaux de surveillance. Par ailleurs, un réseau dense de capteurs sismologiques temporaires a été installé autour de la Montagne Pelée fin 2022 (3 antennes de 8 nodes).

Personnel

Jean-Bernard de Chabaliér, Physicien-Adjoint du CNAP à l'IPGP a assuré la fonction de directeur intérimaire durant la période de septembre à décembre 2022 suite au départ de Fabrice Fontaine le 31 août 2022.

Anthony Potier, ingénieur en instrumentation, a pris ses fonctions le 20 juin 2022 dans le cadre du projet PREST (*Plateforme Régionale de Surveillance Tellurique*). Il assure la mise en place et l'exploitation de la plateforme marine avec notamment l'établissement d'une première carte bathymétrique de la côte nord Caraïbe.

Arnaud Andrieu, ingénieur en instrumentation, a pris ses fonctions le 1er septembre 2022. Il est chargé du déploiement, du suivi et de la maintenance d'un réseau dense de capteurs sismologiques temporaires (3 antennes de 8 capteurs), ainsi que du traitement des données enregistrées.

Divers

Un colloque scientifique international a été organisé à Saint-Pierre par l'OVSM et l'IPGP, du 13 au 19 mai 2022, pour finaliser le projet PREST et permettre à tous les scientifiques participant au projet de présenter leurs résultats. Les partenaires de la Caraïbe étaient présents et les échanges fructueux autour des très nombreuses présentations. Près de 70 scientifiques ont assisté à ce colloque et une quarantaine ont également pu y prendre part en visio-conférence.

Introduction

Dès 1902, Alfred Lacroix, Professeur au Muséum d'Histoire Naturelle, fit établir un observatoire volcanologique sur un piton dépendant du Morne des Cadets, sur le territoire de la commune de Fonds Saint-Denis. Un second poste d'observation fut installé à Assier au Nord du Lorrain. Alfred Lacroix prit la responsabilité de la coordination des observations. L'observatoire, faute de moyens, n'était plus opérationnel quand survint l'éruption de 1929. Ce n'est qu'en 1935, suite aux crédits dégagés par la « contribution nationale », qu'un observatoire moderne fut érigé sur le Morne Moustin, proche de l'ancien observatoire. Il était alors sous la responsabilité du Service Météorologique et de Physique du Globe. C'est en 1946 que la mission de surveillance du volcan fut confiée à l'Institut de Physique du Globe de Paris (IPGP). En 1985, dans le cadre des lois de décentralisation, le bâtiment qui abrite l'observatoire passe sous compétence du département de la Martinique. En 2006, le nom actuel *Observatoire Volcanologique et Sismologique de la Martinique* est adopté et remplace celui d'Observatoire du Morne des Cadets sous lequel il est encore parfois cité.

La nouvelle collectivité unique de Martinique, la *Collectivité Territoriale de Martinique* (CTM) a vu le jour le 1^{er} janvier 2016. Un nouveau bâtiment, situé sur le Morne Rosette à Saint-Pierre, a été mis à disposition du personnel de l'OVSM IPGP et inauguré en décembre 2019. Les missions qui sont confiées à l'IPGP et à son *Observatoire Volcanologique et Sismologique de Martinique* (OVSM) sont les suivantes :

- ❖ Observation et surveillance du volcan actif de la Montagne Pelée ;
- ❖ Observation et analyse de la sismicité locale et régionale ;
- ❖ Participation à l'alerte montante du système d'alerte aux tsunamis, qui est coordonnée à l'échelle de la Caraïbe par l'UNESCO ;
- ❖ Maintenance du système de détection automatique de lahars de la rivière du Prêcheur;



Rapport annuel 2022

Observatoire volcanologique et sismologique de Martinique - IPGP

- ❖ Information des autorités responsables de la protection des personnes et des biens;
- ❖ Participation à des travaux de recherche fondamentale et appliquée dans le domaine des Sciences de la Terre, en géophysique, géologie, et géochimie ;
- ❖ Information préventive et divulgation des connaissances dans les domaines du risque volcanique, du risque sismique, et des risques liés aux tsunamis ;
- ❖ Coopération avec la Collectivité Territoriale de Martinique et les organismes régionaux : Université des Antilles – UA ; Seismic Research Centre – SRC à Trinité et Tobago ; Observatoire Volcanologique de Montserrat – MVO ; Bureau des Mines et de l’Energie – BME en Haïti ; Centro Nacional de Investigacion Sismica – CENAIIS à Cuba ; Bureau de Recherche Géologique et Minière – BRGM, Institut de Recherche pour le Développement -IRD, etc. ;
- ❖ Collaboration étroite et permanente avec l’Observatoire Volcanologique et Sismologique de Guadeloupe – OVSG, et l’Observatoire volcanologique du Piton de la Fournaise – OVPF qui, comme lui, sont des observatoires de l’IPGP.

Tous ces travaux sont effectués avec des chercheurs de l’Institut de Physique du Globe de Paris et en collaboration avec des chercheurs d’autres instituts de recherche. L’observatoire est aussi une structure d’accueil pour des scientifiques français ou étrangers qui viennent effectuer des travaux sur la Montagne Pelée et la région Caraïbe.

Le financement des activités de recherche et de surveillance est assuré par l’Institut de physique du globe de Paris (établissement sous tutelle du Ministère de l’enseignement supérieur, de la recherche et de l’Innovation MESRI, et ayant des conventions avec le Ministère de la transition écologique et solidaire MTES), l’Institut National des Sciences de l’Univers (INSU) du CNRS, par la Collectivité Territoriale de Martinique à laquelle l’IPGP est lié depuis 1985 par une convention, et par des projets nationaux, européens et internationaux déposés par les chercheurs de l’OVSM et de l’IPGP. Une convention de mise à disposition du nouveau bâtiment de l’observatoire a été signée en décembre 2020 entre la CTM et l’IPGP.

Des conventions sont par ailleurs établies avec plusieurs autres organismes, tels que :

- ❖ L’UA et le BRGM, pour la mise en place du Centre de Données Sismologiques des Antilles (CDSA). Une convention cadre a également été signée en janvier 2019 entre le BRGM et l’IPGP ;
- ❖ Le Groupement d’Intérêt Scientifique RAP, pour la maintenance et l’exploitation de stations accélérométriques ;
- ❖ Le CEA, pour la maintenance d’une station de mesure hydroacoustique à Sainte-Anne ;
- ❖ La mairie du Prêcheur, pour la maintenance du système de détection automatique des lahars dans la rivière du Prêcheur. Une convention relative à l’amélioration du système d’alerte lahars de la rivière du Prêcheur a été signée en décembre 2020 entre la mairie du Prêcheur et l’IPGP ;
- ❖ La CTM, pour l’enregistrement de l’accélération du sol lors de séismes ressentis au niveau du barrage de la Manzo ;
- ❖ TDF pour les équipements TDF installés sur le terrain de l’ancien observatoire magnétique et les antennes de radiocommunication de l’observatoire installées sur trois pylônes TDF ;
- ❖ Le Service d’Infrastructure de la Défense, les Forces Aériennes des Antilles, la DDE, l’ONF et des propriétaires privés pour l’hébergement de stations sismologiques sur leurs sites ;
- ❖ L’ADRASEC et le Service de Protection Civile de la Préfecture pour la mise à disposition gratuite d’un espace pour leurs relais de radio-transmission ;
- ❖ L’INRAP, pour la collaboration scientifique pour la recherche chronostratigraphique sur les Antilles françaises.
- ❖ La DEAL, pour des travaux urgents de remise en état du système de détection automatique des lahars de la rivière du Prêcheur.



Activité de la Montagne Pelée

Introduction

La Montagne Pelée est un stratovolcan actif de type explosif situé dans la partie nord de l'île de la Martinique. Cette île de l'arc insulaire des Petites Antilles résulte du plongement de la plaque Sud-Américaine sous la plaque Caraïbe. Le début d'activité de ce volcan est daté à environ 550 000 ans avec la construction du Mont Conil au nord-ouest du cratère actuel. L'édifice volcanique actuel de la Montagne Pelée apparaît probablement autour de 127 000 ans à la suite d'une déstabilisation majeure du Mont Conil. La Montagne Pelée a ensuite connu une lente phase de construction marquée par de multiples éruptions à dôme de lave (Morne Calebasse vers 75 000 ans) et éruptions explosives à nuées ardentes (Tombeau des Caraïbes vers 63 000 ans) jusqu'à environ 36 000 ans où un autre effondrement majeur du volcan se produisit. Entre 36 000 et 25 000 ans, de nombreuses éruptions explosives participent à la reconstruction des flancs de la Montagne Pelée. La période récente depuis 25 000 ans est marquée par au moins 34 éruptions magmatiques (Michaud-Dubuy et al., 2021) dont certaines ont laissé des traces bien visibles au sommet de la Montagne Pelée (Morne Macouba vers 12 000 ans et dôme de l'Aileron vers 9 000 ans) mais aussi tout autour du volcan en niveaux de ponces blanches (éruptions P1, P2 et P3 au cours des derniers 2 000 ans).

Les 4 dernières éruptions de la Montagne Pelée ont été décrites dans les archives historiques :

- ❖ L'éruption phréatique (sans apport de magma) du 22 janvier 1792 avec des explosions mineures ;
- ❖ L'éruption phréatique de 1851, qui a débuté le 5 août 1851, a produit au moins 3 explosions (5 août, 9 août, et fin octobre) et a engendré des retombées de cendres sur les villes du Prêcheur, de Saint-Pierre et du Morne Rouge ;
- ❖ L'éruption magmatique de 1902-1905, précédée par une phase d'activité phréatique, avec la mise en place d'un dôme de lave, d'une explosion latérale dirigée du dôme et d'écoulements pyroclastiques denses et turbulents connus sous le nom de « nuées ardentes ». Une soixantaine de nuées ardentes se produisirent pendant cette période dont celle du 8 mai 1902 qui détruisit la ville de Saint-Pierre, et celle du 30 août 1902 qui ravagea le Morne Rouge. Cette éruption magmatique causa environ 29000 victimes. Une explosion est entendue à plus de 1000 km ;
- ❖ L'éruption magmatique de 1929-1932, aussi précédée par une phase d'activité phréatique, avec des nuées ardentes d'avalanches dans la rivière Blanche et la rivière Claire.

Depuis 1932, l'activité a décliné de manière significative jusqu'à l'arrêt de l'activité fumerollienne depuis 1970 et une activité sismique d'origine volcanique globalement très faible avec seulement quelques essais en 1980, 1985-86 et 2014.

Depuis décembre 2018, l'activité sismique est passée au-dessus de son niveau de base établi à partir des observations instrumentales continues des années précédentes. Cette sismicité est caractérisée par de nombreux événements superficiels de faible énergie, quelques rares séismes profonds entre 10 et 20 km sous l'édifice volcanique, et l'apparition de signaux sismiques de type trémor et longue période. Plusieurs observations phénoménologiques réalisées depuis 2019 reflètent une réactivation du système volcanique. La synthèse de ces observations est représentée en Annexe.

Activité sismique

La sismicité liée à l'activité du volcan de la Montagne Pelée est généralement superficielle et de faible magnitude. Une crise sismique de 55 événements en 6 jours entre octobre et novembre 1980 a été enregistrée par l'observatoire (Boudon et al., 2005). Cette crise est corrélée à un important glissement de terrain se produisant en amont de la Rivière du Prêcheur et à des coulées de boue.

De décembre 1985 à juin 1986, une seconde crise sismique avec des séismes de type volcano-tectonique (événements caractérisés par un signal contenant des hautes fréquences jusqu'à plus de 15 Hz, et qui sont associés à des processus de microfracturation dans l'édifice volcanique), aussi appelé VT, a été détectée en provenance d'une source peu profonde au niveau de l'édifice de la Montagne Pelée (Hirn et al., 1987). La **Figure 1** montre un exemple de VT observés à la station sismique LAM au sommet de la Montagne Pelée en 1985-86. La détection de ces séismes fut possible grâce au déploiement de sismomètres sur le volcan, mais Hirn et al. (1987) suggèrent la présence de séismes similaires dans les sismogrammes de 1976.



Rapport annuel 2022

Observatoire volcanologique et sismologique de Martinique - IPGP

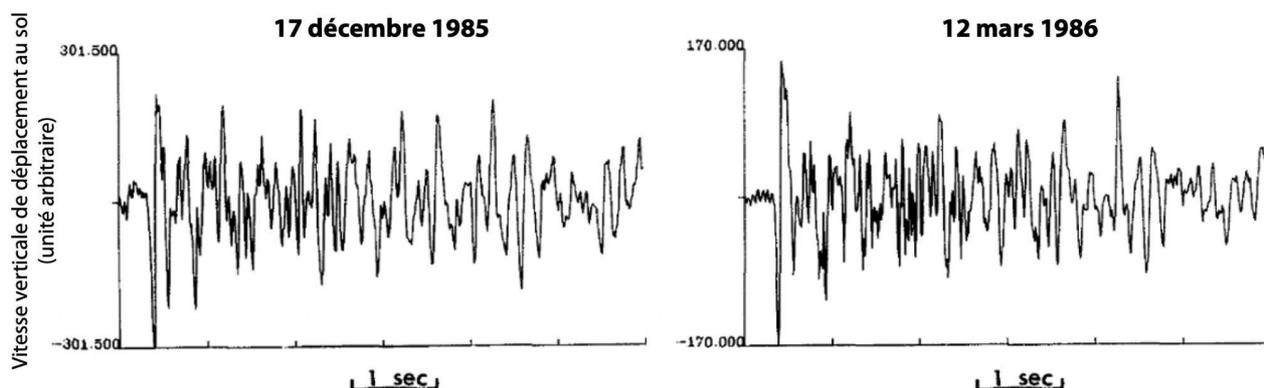


Figure 1. Sismogrammes de deux séismes VT de type 1 enregistrés le 17 décembre 1985 et le 12 mars 1986 à la station sismique LAM située au Morne La Croix au niveau de la Montagne Pelée. D'après Hirn et al. (1987).

Les séismes VT observés depuis 1976 (**Figure 1**) sont observés encore aujourd'hui avec le réseau sismique de l'OVSM-IPGP (**Figure 2**). Ceux-ci forment un type de séisme volcano-tectonique appelé VT de type 1 dans la suite de ce rapport. Une observation remarquable est la similarité des enregistrements réalisés en 1985-86 (**Figure 1**) et ceux mesurés par l'OVSM-IPGP depuis 2020 (**Figure 2**).

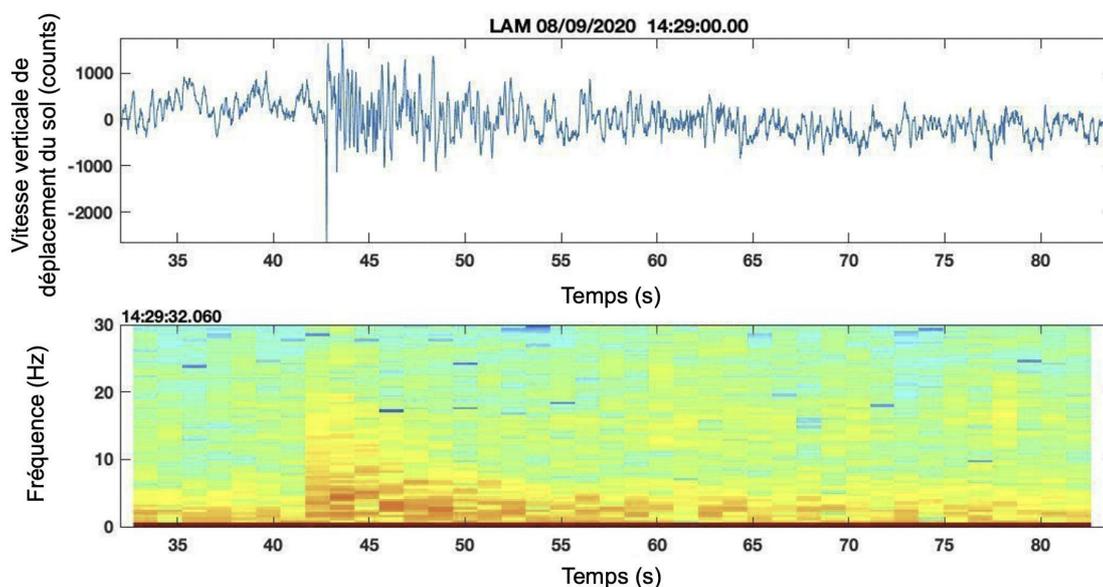


Figure 2. (Haut) Exemple de sismogramme d'un séisme de type VT de type 1 enregistré le 8 septembre 2020 à 14h29 (TU) au niveau de la station large bande LAM installée sur la Montagne Pelée depuis fin 2005. L'axe vertical représente la vitesse de déplacement du sol (en counts) selon la direction verticale. (Bas) Spectrogramme.

La sismicité enregistrée par les réseaux de surveillance entre le 1^{er} janvier 1999 et le 1^{er} janvier 2023 est généralement faible, avec une valeur médiane de 30 tremblements de terre par an (**Figure 3**). Nous remarquons la présence d'un essaim de sismicité en 2014 à la suite d'un séisme d'origine tectonique de magnitude 6.5, largement ressenti en Martinique (intensité atteignant IV-V), ayant eu lieu le 18 février 2014 à 9h27 (TU) et à 210 km à l'est de la Martinique. Cet essaim de séismes de type VT pourrait être en grande partie associé à ce fort séisme tectonique et à ses répliques.



Rapport annuel 2022

Observatoire volcanologique et sismologique de Martinique - IPGP

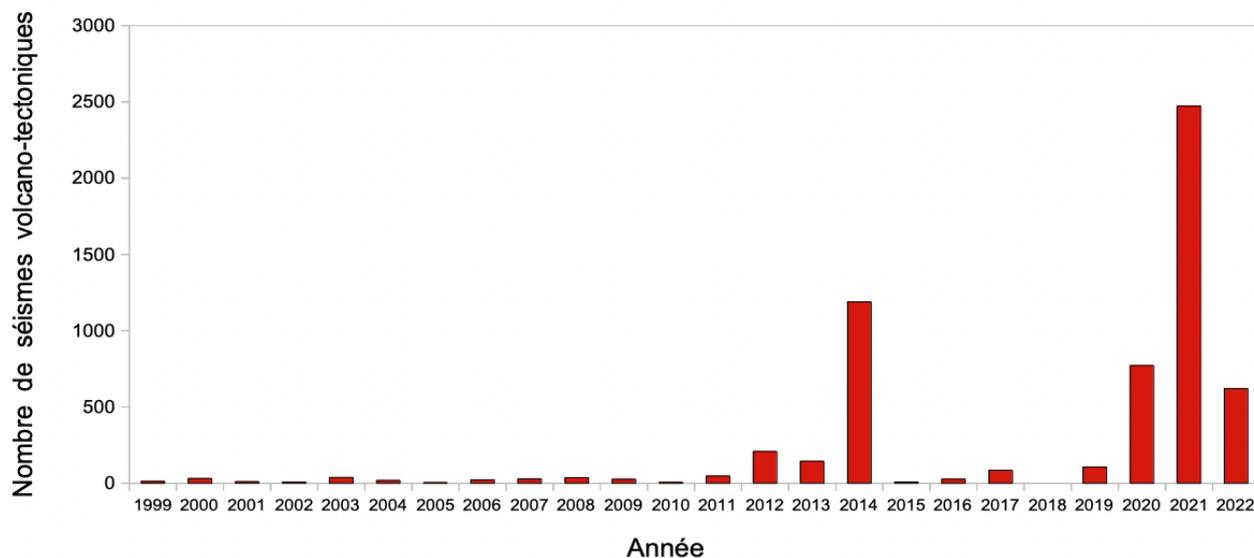


Figure 3. Évolution du nombre quotidien de tremblements de terre de type volcano-tectoniques (VT) enregistrés à l'OVSM IPGP du 1^{er} janvier 1999 au 1^{er} janvier 2023 (source WebObs / OVSM).

La **Figure 4** montre l'évolution du nombre cumulé de séismes de type VT depuis le début du mois de janvier 2014. Grâce à l'utilisation depuis la mi-2020 d'un traitement automatique précis des données sismiques, nous avons pu vérifier et confirmer la présence de ces événements. Alors que peu de séismes de type volcano-tectonique sont observés entre le 1^{er} janvier 2015 et le 1^{er} avril 2019, une augmentation est constatée à partir d'avril 2019 et le taux de sismicité augmente plus fortement à partir de novembre 2019. Une analyse fine de la sismicité depuis 2014 avec deux approches complémentaires (détections automatiques et manuelles) montre qu'entre le 1^{er} janvier 2015 et le 1^{er} avril 2019 le niveau de base de la sismicité de type VT était de **24 séismes par an, soit 2 séismes par mois** avec un écart-type de 6. Une sismicité volcanique accrue est observée à partir d'avril 2019 et est située à 4-5 km en dessous du sommet. Une plus forte augmentation est enregistrée entre le 2 et le 15 décembre 2020 avec 316 tremblements de terre VT au cours de cette période (**Figure 4**).

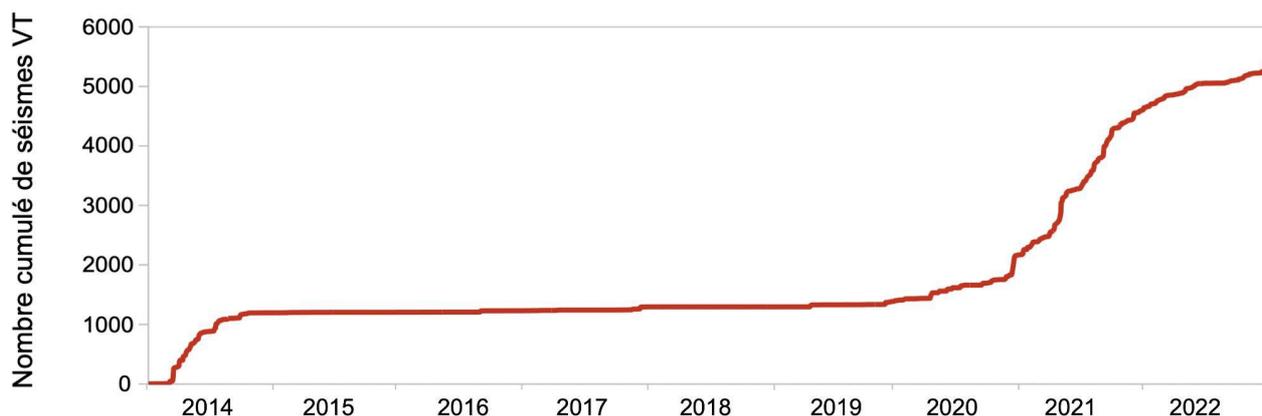


Figure 4. Nombre cumulé de séismes volcano-tectoniques du 1^{er} janvier 2014 au 1^{er} janvier 2023. Les tremblements de terre VT proviennent du catalogue manuel de l'OVSM-IPGP (ws.ipgp.fr/fdsnws/event, <https://doi.org/10.18715/MARTINIQUE.OVSM>).

Au cours de l'année 2022, l'OVSM-IPGP a détecté au moins **628 séismes de type volcano-tectonique (VT)**. Ces séismes, de magnitude inférieure ou égale à 1,9 n'ont pas été ressentis par la population.



Rapport annuel 2022

Observatoire volcanologique et sismologique de Martinique - IPGP

La **Figure 5** montre l'évolution du nombre de séismes VT depuis le 1er janvier 2022. Certains de ces événements ne sont pas localisables étant donné leur faible amplitude. Parmi ces 628 séismes de type VT, **136 ont pu être localisés** sous la Montagne Pelée, entre 0,5 et 2,1 km de profondeur sous la surface (**Figure 6**). La majeure partie de la sismicité reste localisée au niveau du système hydrothermal de la Montagne Pelée avec une majorité d'événements en amont de la rivière Chaude.

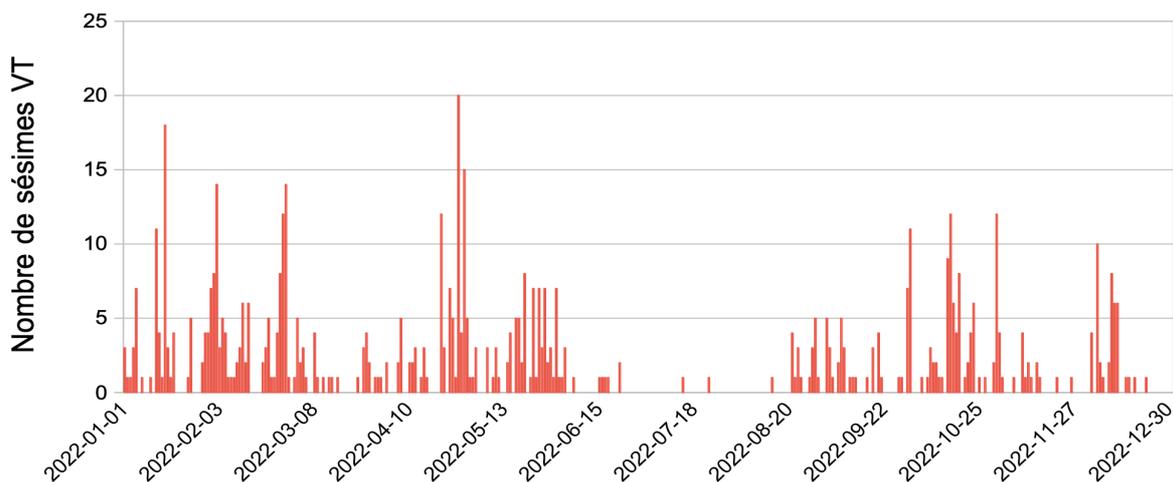


Figure 5. Nombre journalier de séismes de type volcano-tectonique détectés du 1^{er} janvier 2022 au 31 décembre 2023. L'axe vertical représente le nombre de séismes (source WebObs / OVSM).

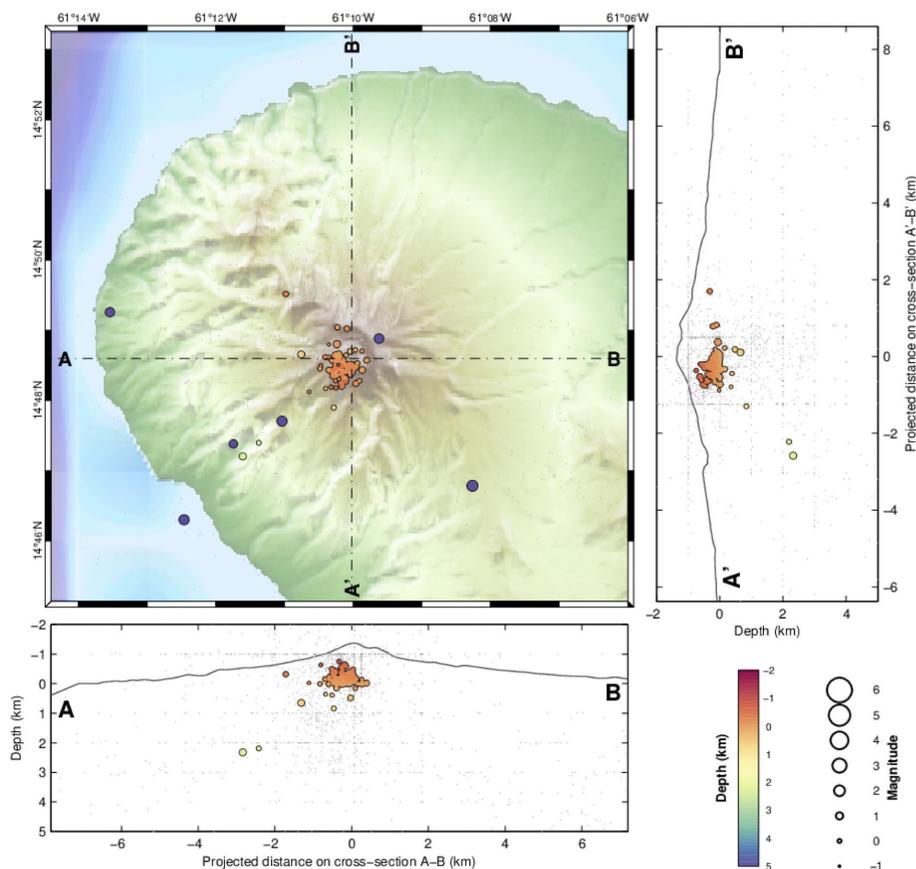


Figure 6. Carte de localisation de la sismicité de la Montagne Pelée en 2022 et coupes nord-sud et est-ouest montrant la localisation en profondeur des hypocentres. La majeure partie de la sismicité est située à moins de 2 km de profondeur sous la surface. Les points bleus correspondent à des séismes hybrides profonds (source WebObs/OVSM).



Rapport annuel 2022

Observatoire volcanologique et sismologique de Martinique - IPGP

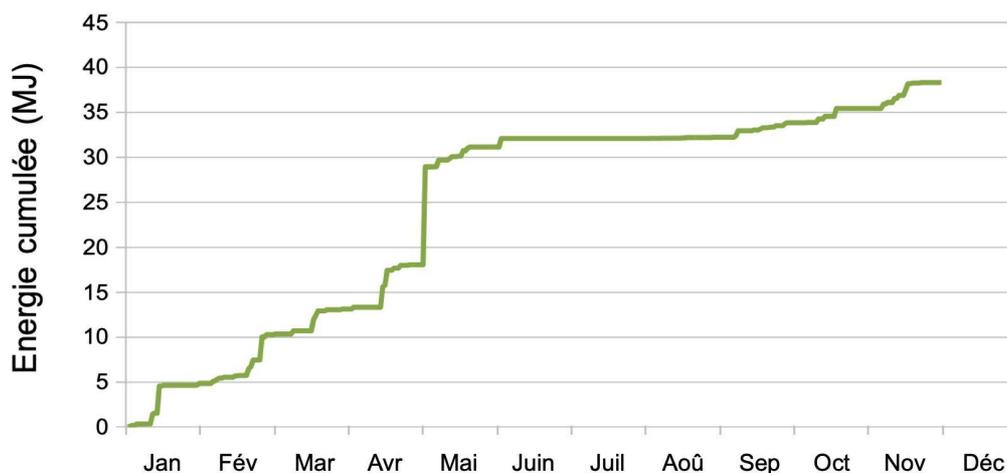


Figure 7. Cumul de l'énergie sismique libérée par les séismes associés à l'activité de la Montagne Pelée en 2022 (source WebObs/OVSM).

L'énergie sismique libérée par les séismes associés à l'activité sismique de la Montagne Pelée en 2022 reste faible malgré l'augmentation du nombre de séismes (**Figure 7**).

En 2022, l'OVSM-IPGP a enregistré 29 signaux sismiques de type hybride (22 superficiels et 7 profonds), 4 de type longue période et aucun de type trémor. Ces signaux de type hybride et longue période, contenant des basses fréquences, sont associés à la présence et à la migration de fluides du système hydrothermal (gaz, eaux hydrothermales) dans l'édifice volcanique. Le **Tableau 1** montre l'évolution mensuelle des différents types de signaux sismiques enregistrés au cours de l'année 2022.

Nombre de séismes	Janvier 2022	Février 2022	Mars 2022	Avril 2022	Mai 2022	Juin 2022
Volcano-tectonique	83	108	34	94	80	15
Longue période	0	2	0	0	0	0
Hybride	0	3	0	7	4	0
Trémor	0	0	0	0	0	0

Nombre de séismes	Juillet 2022	Août 2022	Septembre 2022	Octobre 2022	Novembre 2022	Décembre 2022
Volcano-tectonique	2	20	40	90	19	43
Longue période	0	0	1	1	0	0
Hybride	0	1	5	7	0	2
Trémor	0	0	0	0	0	0

Tableau 1. Répartition des types de signaux sismiques détectés en 2022 par l'OVSM-IPGP.

Notons que plusieurs familles de séismes de type VT ont été observées au niveau de l'édifice volcanique, principalement à proximité de la falaise Samperre et dans la zone du système hydrothermal de la Montagne Pelée (**Figure 8** et **Tableau 2**).

L'activité sismique actuelle pourrait marquer l'augmentation de l'activité du système hydrothermal : interaction entre l'eau, les roches et une source de chaleur au sein de la Montagne Pelée.



Rapport annuel 2022

Observatoire volcanologique et sismologique de Martinique - IPGP

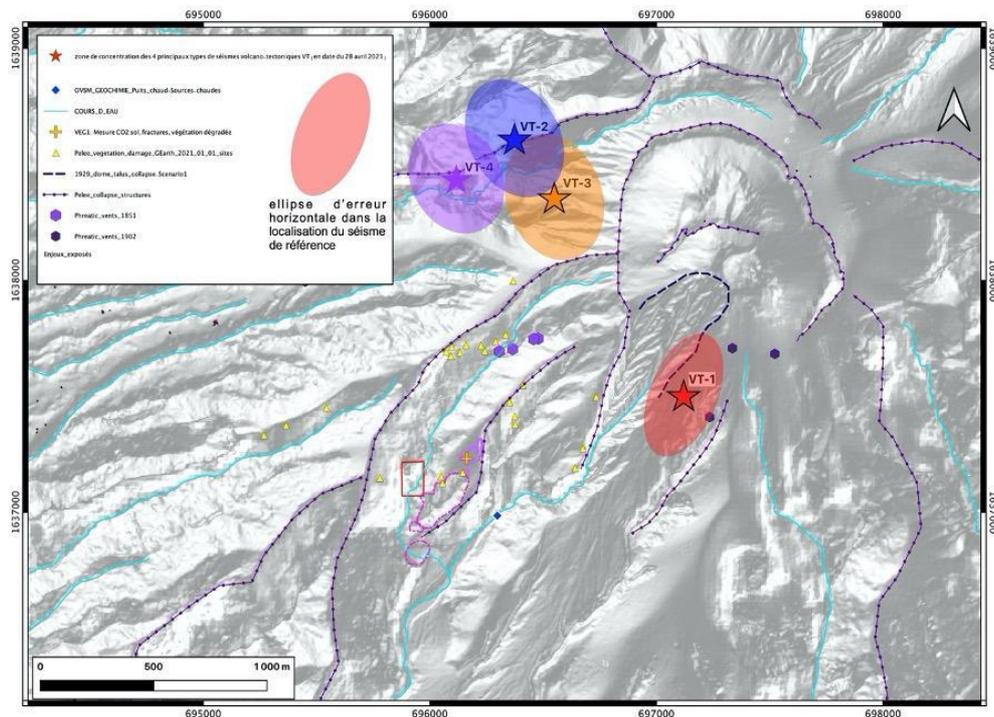


Figure 8. Carte de localisation des séismes VT de type VT1 à VT4 détaillés dans le Tableau 2.

Nom	Date des premières observations	Profondeur par rapport à la surface	Localisation
VT1	séismes récurrents depuis au moins les années 70	1 km $0.7 \pm$	zone du système hydrothermal, amont de la rivière Chaude
VT2	19 avril 2021	2.3-4 km	à proximité de la falaise Samperre
VT3	25 avril 2021	$\approx 2 \pm 1$ km	à proximité de la falaise Samperre
VT4	26 avril 2021	$\approx 1-2$ km	à proximité de la falaise Samperre
VT5	24 juin 2021 (01:54:06 UTC) mais un séisme aussi le 13 mars 2014	$\approx 0.5-1$ km	zone du système hydrothermal
VT6	1 ^{er} juillet 2021 mais un séisme aussi le 11 mars 2014	≈ 1 km	zone du système hydrothermal
VT7	26 novembre 2021	$\approx 0.7-1.1$ km	zone du système hydrothermal
VT8	le 27 et le 28 novembre 2021	$\approx 6.9-9.5$ km	à proximité d'Ajoupa-Bouillon
VT9	le 5 décembre 2021	$\approx 7.2-9.4$ km	à proximité de Grand'Rivière

Tableau 2. Comparaison des profondeurs des différents types de familles de séismes de type VT enregistrés depuis 2021 et chronologie de ces séismes de type VT.



Phénoménologie

Zone de végétation dégradée

Une zone de végétation dégradée localisée sur le flanc sud-ouest de la Montagne Pelée entre la haute rivière Claire et la rivière Chaude a été identifiée en décembre 2020 (VEG-1). D'après l'analyse d'images satellitaires, cette zone, composée de troncs d'arbres et de fougères sans têtes, défoliés ou abattus, et d'herbes et de buissons jaunis, est apparue à la fin de l'année 2019. Elle est située à proximité des cratères des éruptions phréatiques historiques de 1792 et 1851.

Les zones de végétation dégradée sont suivies visuellement par des survols hélicoptérés (soutien de la Sécurité civile) et par imagerie satellitaire. Le suivi temporel de végétation normalisé (NDVI), paramètre sensible à la vigueur et à la densité de la végétation, a été effectué à partir des images satellitaires Sentinel_2 (ESA, CNES, CNRS, résolution de 10 m sur la zone VEG-1) et les images Planets (résolution de 3 m). Cette analyse a permis d'identifier d'autres zones de végétation dégradée (VEG-2, VEG-3 et VEG-4) à proximité de la zone VEG-1 (**Figure 9**).



Figure 9. Survol hélicoptéré (hélicoptère de la Sécurité Civile Dragon 972) le 5 mai 2022 de la zone VEG-3 (à gauche) et d'une partie des zones VEG-2 et VEG-4 (à droite) vers la confluence entre la rivière Chaude et la rivière Claire (Photos OVSM-IPGP).

Les résultats montrent que la zone VEG-2 continue de dépérir tandis que la végétation continue de repousser sur VEG-1. On observe également une légère progression du dépérissement sur le flanc sud du Morne Plumé (VEG-3), et un dépérissement de végétation dans une mare située dans la haute rivière Claire (VEG-4) qui pourrait correspondre à un ancien cratère d'explosion phréatique (**Figure 9**). L'OVSM-IPGP a également identifié une zone de dégradation de la végétation (VEG-5) localisée dans l'interfluve situé à l'ouest et au-dessus de la rivière Chaude, dans la zone du système hydrothermal actif et au-dessus de la zone de sismicité récurrente de la Montagne Pelée (**Figure 10**).

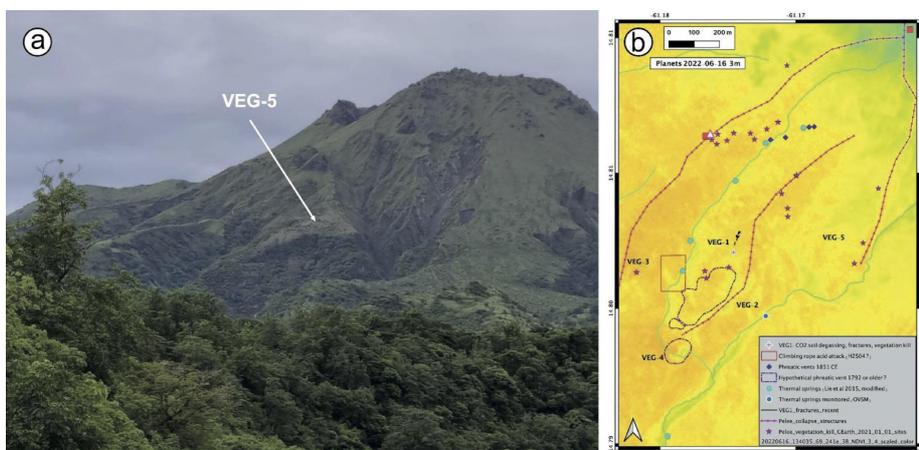


Figure 10. a) Photographie de la zone de végétation brunie et dégradée VEG-5 le 26 août 2022 (photo J.-G. Gabriel, OVSM-IPGP). b) Représentation de l'indice NDVI pour le suivi approximatif du dépérissement de la végétation, de l'orange (non dégradée), au jaune (faiblement dégradée), et au vert (fortement dégradée). Analyse des images satellitaires Planets sur les zones VEG-1 à VEG-5 par R. Grandin (UP-IPGP, ISDeform) et J.-C. Komorowski (IPGP, SNOV).



En 2022, il y a eu au total six images satellites exploitables permettant de compléter le suivi de l'indice NDVI (Figure 11).

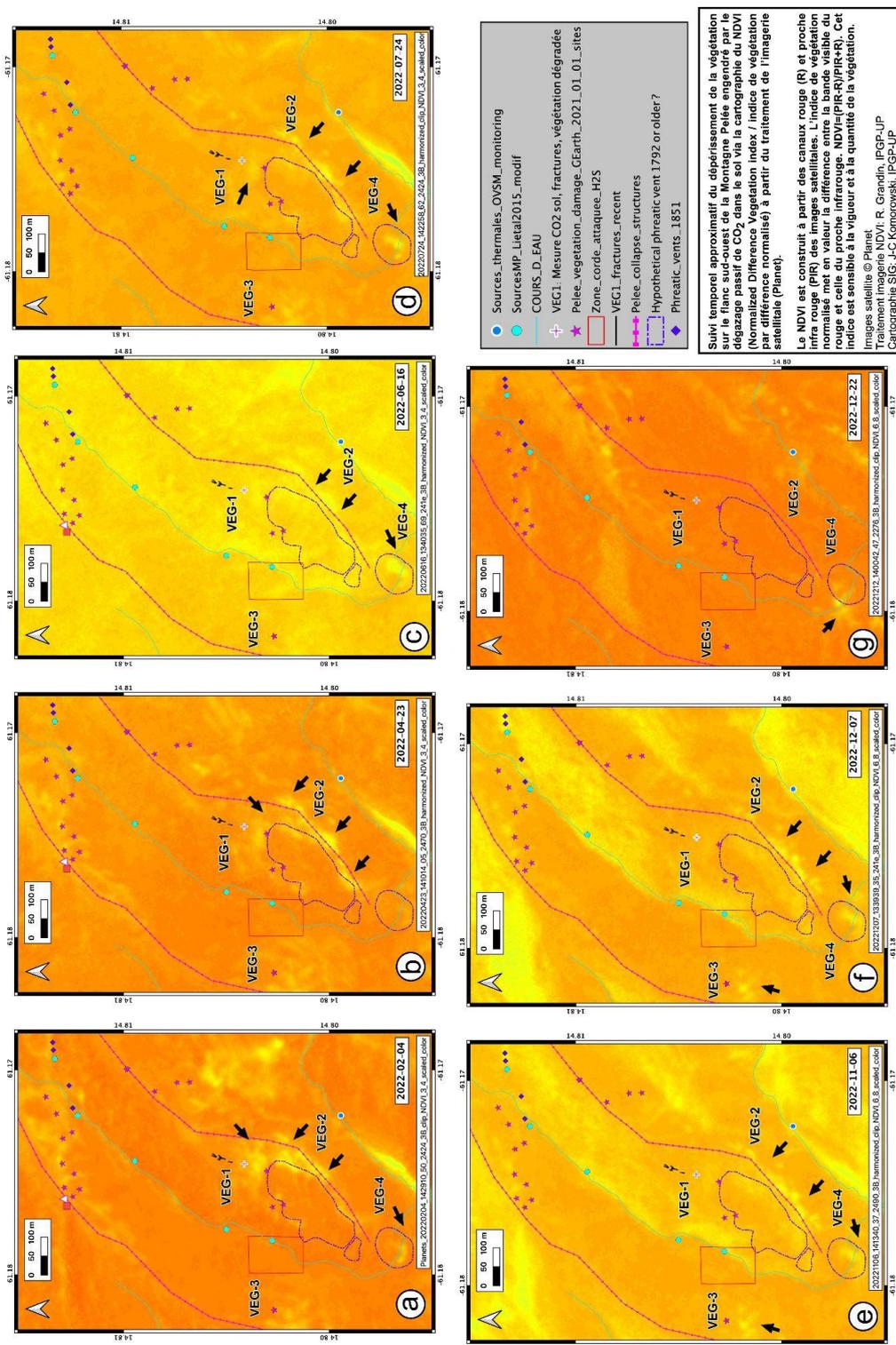


Figure 11. Analyse des indices NDVI pour le suivi approximatif du dépérissement de la végétation au (a) 4 février 2022, (b) 23 février 2022, (c) 16 juin 2022, (d) 24 juillet 2022, (e) 6 novembre 2022, (f) 7 décembre 2022, et (g) 22 décembre 2022. La couleur correspond au niveau de dégradation, de l'orange (non dégradée), au jaune (faiblement dégradée), au vert (fortement dégradée). Voir le texte en légende pour plus de détails (source R. Grandin & J.C. Komorowski / IPGP).



Rapport annuel 2022

Observatoire volcanologique et sismologique de Martinique - IPGP

Dégazage en mer

Une zone d'émission de bulles de gaz à partir du fond marin a été observée au nord de Saint-Pierre, au niveau de l'embouchure de la rivière des Pères, à moins de 11 m de profondeur, suite au signalement d'un pêcheur fin juin 2021. Selon plusieurs témoignages, ce dégazage diffus pourrait exister depuis plusieurs décennies dans cette zone. Sa surveillance quantitative peut servir d'indicateur sur l'évolution de la réactivation en cours à la Montagne Pelée. C'est pour cette raison que dès le mois d'août 2021, l'OVSM-IPGP a mis en place une collaboration avec le Parc Naturel Marin de Martinique pour effectuer des mesures périodiques (pH, température, débit maximum et superficie de la zone), et si possible des prélèvements de gaz pour analyse chimique. Ce type d'émission de gaz est habituel aux alentours des zones volcaniques actives ou au repos, par exemple en Dominique (Soufrière et Champagne), en Italie (sites de Panarea, Vulcano, Baie de Pozzuoli) et en Grèce (Santorin).

En 2022, l'OVSM-IPGP a réalisé 5 missions de mesures et de prélèvements en collaboration avec les plongeurs du PNMM (**Figure 12**). Le **Tableau 3** montre les mesures de température réalisées entre août 2021 et novembre 2022. La température moyenne au niveau des remontées de train de bulles reste supérieure à la température moyenne de la zone témoin (eau environnante sans remontées de bulles).

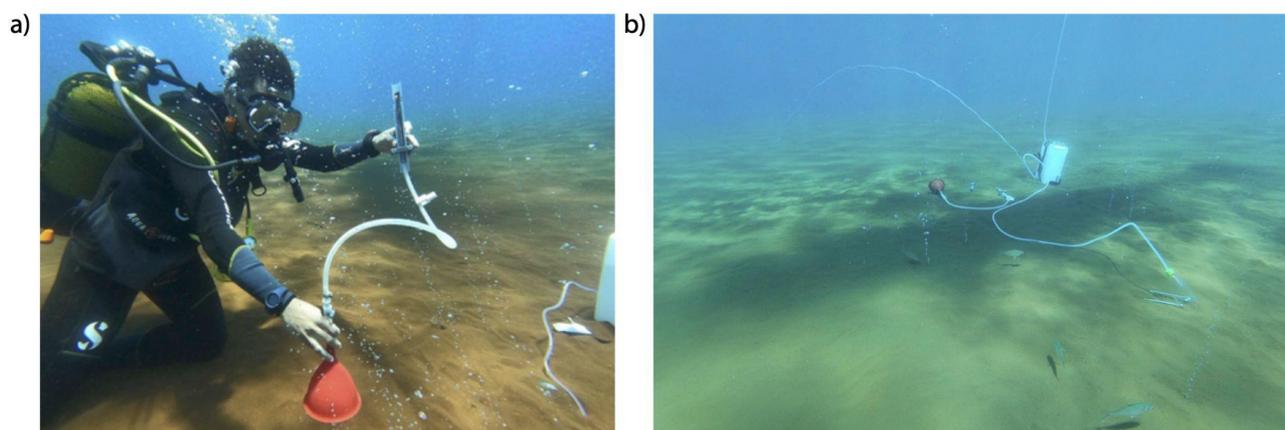


Figure 12. Photographies illustrant la méthode de mesures et de prélèvement des trains de bulles à moins de 10 m de profondeur sur un site localisé entre Saint-Pierre et le Prêcheur : a) plongeur prélevant un échantillon, et b) dispositif de prélèvement de gaz incluant une ampoule à vide et trois tubes de cuivre pour l'analyse isotopique de l'hélium (photos OVSM-IPGP).

	12/08/21	02/09/21	15/09/21	28/10/21	15/12/21	12/07/22	13/09/22	21/11/22
Température témoin °C	28,9	29,1	29,6	29	28,9	29,0	29,5	28,5
Température cheminée °C	30,9	30,5	30,8	31	29,1	30,0	30,5	29,5
Ecart moyen °C	2	1,4	1,2	2	0,2	1,0	1,0	1,0

Tableau 3. Évolution des températures mesurées sur la zone de dégazage en mer entre août 2021 et novembre 2022.

Le pH a été mesuré avec des prélèvements directement à la sortie des fumerolles pour être au plus près de la valeur réelle et des mesures précédentes (**Tableau 4**).

En 2022, nous avons mesuré au niveau de remontées de train de bulles des températures comprises entre 29,5 et 30,5 °C, et un pH compris entre 6,18 et 7,79.



Rapport annuel 2022

Observatoire volcanologique et sismologique de Martinique - IPGP

	15/09/21 (OVSM)	28/10/21 (OVSM)	28/10/21 (PNMM)	15/12/21* (OVSM)	15/12/21 (PNMM)	12/07/22 (OVSM)	13/09/22 (OVSM)	21/11/22 (OVSM)
PH	6.25	6.07	5.5	7.6*	5.52	7.79	6.18	6,64
PH Témoin	8.12	8.16	8.3	9.15*	8.2	7.97	8.18	8,05

Tableau 4. Évolution du pH mesuré sur la zone de dégazage en mer entre août 2021 et novembre 2022. * Noter que les valeurs de pH effectuées avec la sonde OVSM le 15 décembre ne sont pas considérées comme fiables étant donné la valeur du pH témoin.

Des prélèvements de gaz ont été également réalisés en juillet et septembre 2022. Les résultats des analyses isotopiques sont présentés dans le **Tableau 5**.

Zone de prélèvement	d13C	d18O
PEBL 12/07/2022	-5.31	37.83
PEBL 13/09/2022	-5.79	

Tableau 5. Résultats des analyses isotopiques des échantillons prélevés sur la zone de dégazage en mer en 2022.

Les résultats indiquent que le CO₂ libéré dans cette zone de dégazage en mer possède une signature isotopique similaire à celle du CO₂ d'origine magmatique. D'autres analyses incluant des mesures isotopiques ³He/⁴He sont en cours au Centre de Recherches Pétrographiques Géochimiques (CRPG).

En 2022, nous avons pu réaliser un suivi de l'étendue de la zone de dégazage en mer (**Figure 13**). Les résultats obtenus indiquent que la superficie de la zone a légèrement augmenté de 1180 m² en juillet 2022 à 1443 m² en septembre 2022, puis s'est réduite à 770 m² en novembre 2022. Notons cependant que les fortes pluies de la semaine précédent la mesure du mois de novembre ont provoqué des flux sédimentaires, entraînant un dépôt sur le sol et potentiellement une obstruction. De plus, la visibilité de la zone au cours des prises de mesures était plus faible que les fois précédentes. L'hypothèse du dépôt sédimentaire suite aux pluies sera vérifiée avec de prochaines mesures dans quelques mois au cours de la saison sèche.



Figure 13. Évolution temporelle de la superficie de la zone de dégazage en mer entre le 12 juillet 2022 (zone en vert), le 13 septembre 2022 (zone en beige) et le 21 novembre 2022 (zone en pourpre). Source OVSM-IPGP.



Déformation du sol

GNSS Permanents et de répétition

Depuis le milieu de l'année 2022, les mesures du réseau permanent de capteurs GNSS de l'OVSM-IPGP intégrées sur un an ont confirmé l'existence d'un léger signal de déformation avec des vitesses de déplacement horizontal entre 2 ± 1 mm/an et 6 ± 3 mm/an, détectées sur la plupart des stations situées sur l'édifice de la Montagne Pelée. Ces déformations, de direction globalement radiales au volcan, restent faibles mais traduisent une inflation ou extension significative de l'édifice (**Figure 14**).

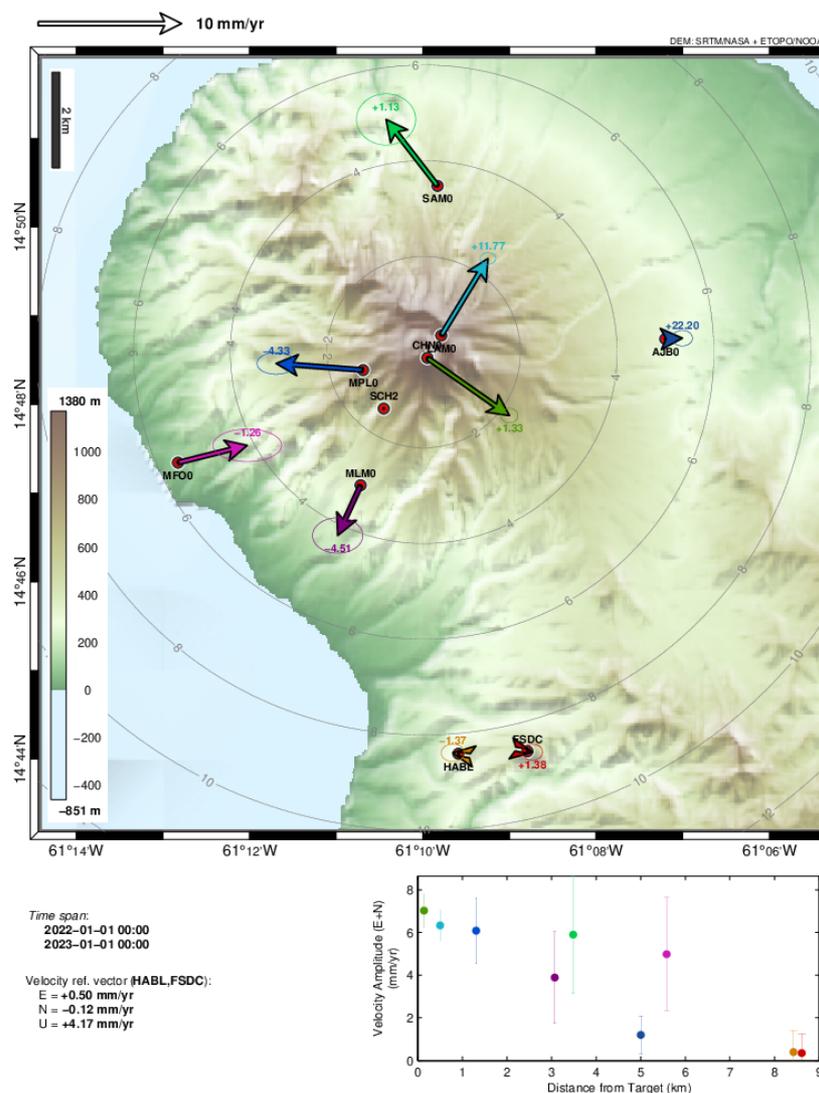


Figure 14. Vecteurs des vitesses moyennes de déformations horizontales mesurées entre le 1er janvier et le 31 décembre 2022 sur la Montagne Pelée (échelle donnée en haut à gauche en mm/an). Chaque vecteur est associé à une ellipse d'erreur ainsi qu'une indication de la vitesse verticale (globalement non significative). Les cercles concentriques gris indiquent les distances en km depuis le sommet. Les deux stations situées au nouveau et à l'ancien observatoire (respectivement HABL et FSDC) sont supposées stables et servent de référence (la vitesse moyenne des deux stations est inférieure à 0,5 mm/an). Le graphe en bas à droite représente les amplitudes horizontales en fonction de la distance au sommet pour chaque station, avec les barres d'erreur correspondant à ± 1 sigma, soit 68% de probabilité (source F. Beauducel & JB de Chabalière / WebObs / OVSM).



Rapport annuel 2022

Observatoire volcanologique et sismologique de Martinique - IPGP

Ces signaux sont compatibles avec une source de pressurisation superficielle située entre 1 et 2 km de profondeur sous la surface, déterminée par une inversion bayésienne des observations au travers d'un modèle simple de point source de pression dans un milieu élastique homogène. La **Figure 15** montre le résultat de l'inversion : l'incertitude sur la position de la source est relativement élevée (environ 1 km), en raison principalement des erreurs importantes sur les solutions GNSS. La variation de volume correspondant à cette source de pression est estimée à $+140.000 \pm 50.000 \text{ m}^3$, mais la localisation exacte et notamment la profondeur étant mal contrainte, cette valeur est à prendre avec précaution, ne donnant probablement qu'un bon ordre de grandeur du phénomène.

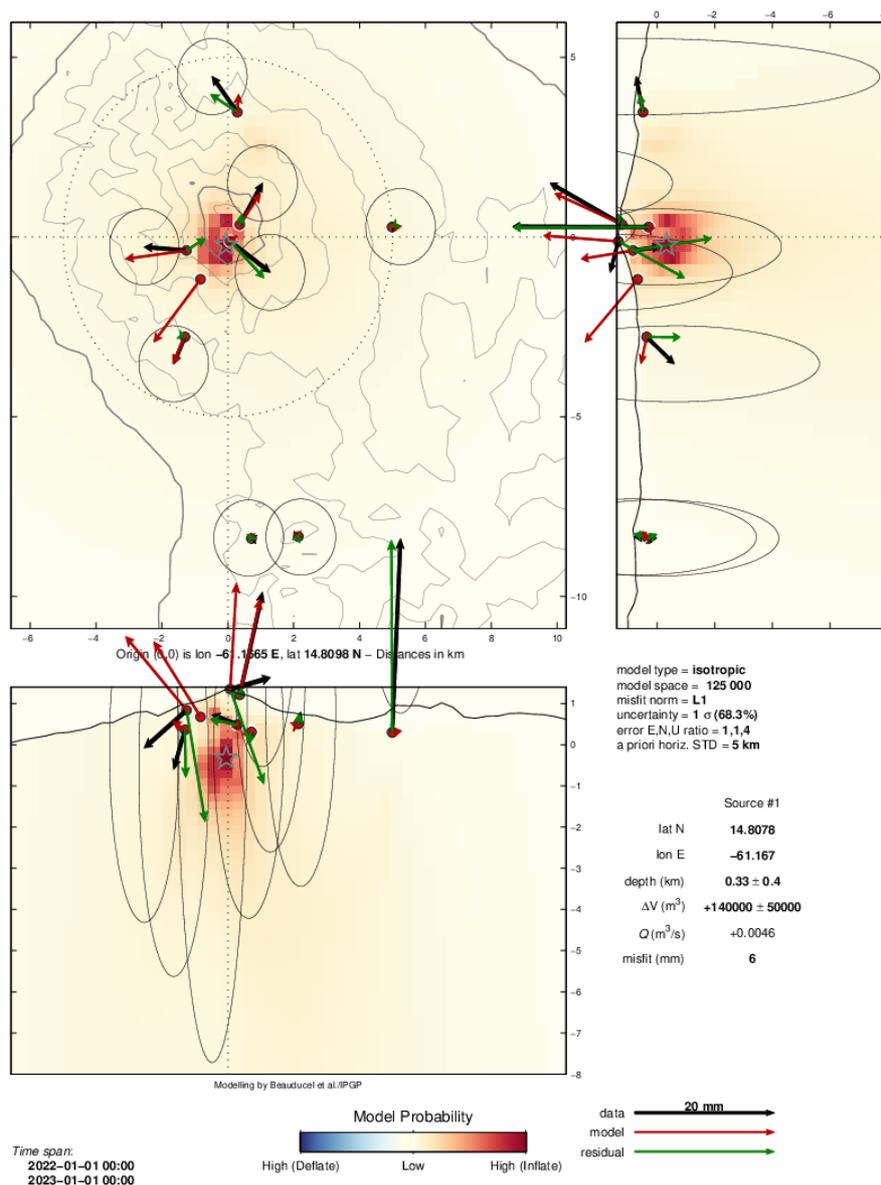


Figure 15. Modélisation 3D des déplacements GNSS durant l'année 2022 par inversion bayésienne d'une source de déformation simple et unique, vu en plan et en coupes verticales Est-Ouest et Nord-Sud : les zones colorées correspondent à la probabilité d'existence de cette source à un emplacement donné (le rouge correspondant à une source en inflation), une étoile indique la position de probabilité maximale, vecteurs déplacement (flèches noires et ellipse d'erreur), vecteurs modélisés (flèches rouges), résidus (flèches vertes) (source F. Beauducel / WebObs / OVSM).



Rapport annuel 2022 Observatoire volcanologique et sismologique de Martinique - IPGP

Cette source pourrait être engendrée par la remontée de volumes limités de fluides hydrothermaux et/ou magmatiques (gaz, eaux hydrothermales) dans l'édifice volcanique.

Les déformations auraient débuté approximativement vers le milieu de l'année 2021 et restent globalement stables jusqu'en décembre 2022, comme le montre la **Figure 16** : les variations de lignes de base observées depuis 2019 indiquent une transition globale survenue vers la mi-2021. La plupart des lignes de base sont en effet stables avant cette date, et les lignes proches du sommet indiquent une extension marquée et relativement régulière ensuite, avec des vitesses d'extension moyenne entre 0 et 14 mm/an maximum pour la ligne MPL0-LAM0. En termes de déplacement total, cela correspond à un allongement de la ligne de base de 22 mm jusqu'à fin 2022. En termes de déformation (variation relative de distance), c'est sur la ligne de base la plus courte CHN0-LAM0 que l'on enregistre la valeur la plus forte, avec un allongement total de +14 mm sur une ligne de 550 m, soit une déformation en extension de $+2,5 \cdot 10^{-5}$.

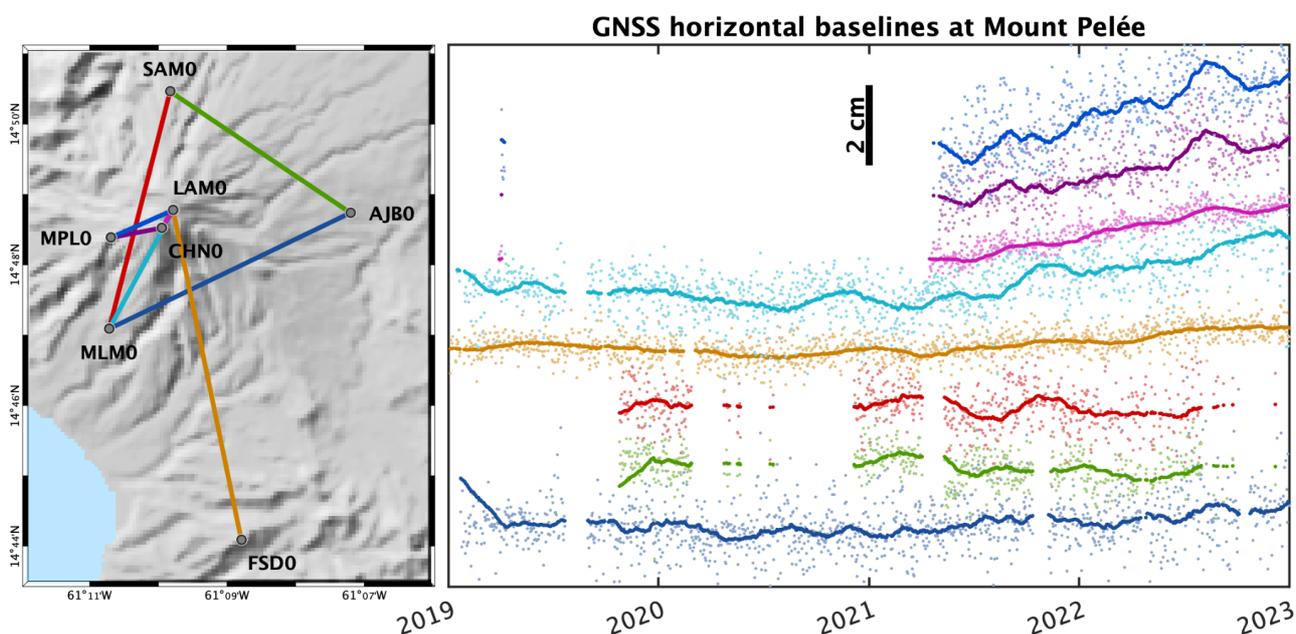


Figure 16. Variation des distances horizontales (lignes de base) sur la Montagne Pelée, calculées à partir des données journalières du réseau GNSS permanent. (*Gauche*) Position des lignes de base entre chaque couple de station (FSD0 correspond à la station située à l'ancien observatoire du Morne des Cadets). (*Droite*) Évolution des distances horizontales pour chaque couple de station sur 4 années (2019-2022) : données journalières brutes (points) et filtrées par moyenne glissante sur 60 jours (lignes). Les périodes sans données correspondent à des interruptions techniques ou à des stations qui ont été passées en enregistrement continu courant 2021 (source F. Beauducel / IPGP).

Durant l'année 2022, un effort important a été fourni pour renforcer les mesures de déformation avec le GNSS, soutenu par le projet PREST (missions pilotées par J.B. de Chabalière). Les déformations mesurées par les stations GNSS permanentes (acquisition et calcul journalier) montrant une déformation significative de la partie sommitale de la Montagne Pelée, deux campagnes de mesures du réseau de répétition ont été réalisées pour renforcer ces observations et évaluer les déformations plus distales du sommet, plus sensibles aux processus volcaniques profonds (activité magmatique).

Ces campagnes ont bénéficié du soutien du parc national de stations GNSS de l'INSU, avec 10 équipements qui sont restés à l'OVSM d'avril à décembre 2022 :

- du 24 avril au 20 mai 2022, 14 sites des flancs de la Pelée ont été mesurés avec plus de 6 jours de mesure par site : GRIV, PRIL, LRIZ, MA10, CALB, PEC0, RRA0, RAP0, LDV0, LDV1, RBL0, LPR0, CLE0, LGA0.



Rapport annuel 2022

Observatoire volcanologique et sismologique de Martinique - IPGP

- du 10 septembre au 19 décembre 2022, 22 sites (tous) ont été mesurés, avec plus de 15 jours d'acquisition sur plusieurs périodes pour la plupart : GRIV, PRIL, LRIZ, MA10, CALB, PECO, RRA0, RAP0, LDV0, LDV1, RBL0, LPR0, CLE0, LGA0, SCH0, PTB0, FSD0, MMA0, DM20, TRF1, PBO0, GLIC.

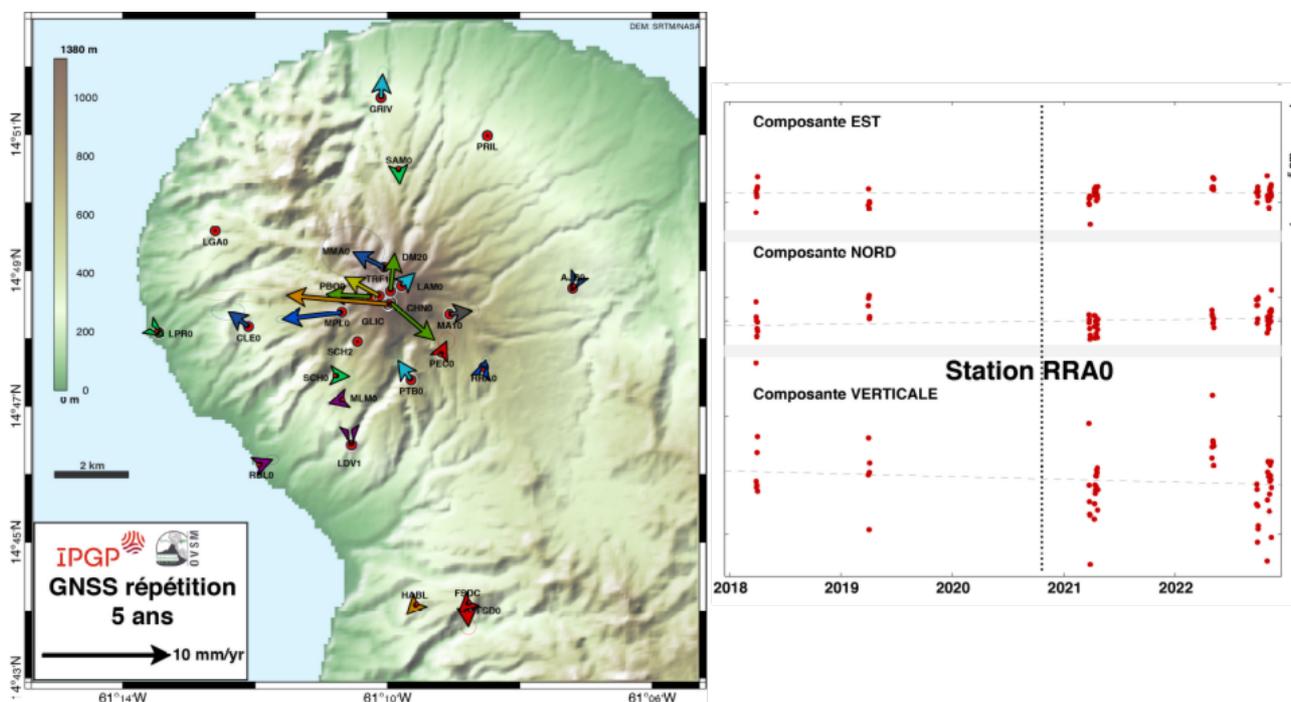


Figure 17. Champs de vecteurs vitesses des stations GNSS permanentes et de répétition sur les 5 dernières années, obtenues avec un calcul Gipsy (à gauche). Exemple de série temporelle du site RRA0 sur la même période avec les différentes campagnes GNSS (à droite).

Les stations distales (loin du sommet) montrent des déformations négligeables, et confirment des mouvements magmatiques faibles ou non détectables en profondeur (5-10 km). En revanche, les stations sommitales confirment des déformations significatives mesurées par les stations permanentes, avec une source de pressions localisée à environ 1 km sous le sommet.

Inclinométrie

La variation de l'inclinaison et la température mesurées à 30 m de profondeur au niveau du forage situé à Ajoupa Bouillon sont représentées à la **Figure 18**. La variation de l'inclinaison et la température mesurées à 60 m de profondeur sont représentées à la **Figure 19**. Les mesures des inclinomètres sont affectées par les séismes de forte magnitude. Un saut de l'inclinaison est ainsi nettement visible sur les deux voies de chaque instrument le 14 décembre 2022 à 22h UTC (18h locale) correspondant à un séisme de subduction de magnitude 3.5. Aucune donnée n'est disponible du 10 octobre à début décembre 2022 en raison d'une panne du système d'acquisition embarqué. La température est aussi représentée pour comparaison car les variations d'inclinaison sont aussi sensibles aux changements de pression atmosphérique et de température (e.g., Fontaine et al., 2014).

L'évolution à long-terme des variations de l'inclinaison est représentée sur la **Figure 20**. A 30 m, les variations brusques d'inclinaison que l'on peut observer sont liées à de forts séismes. Il n'y a pas de tendance visible. A 60 m, la pente observée depuis juin 2021 pourrait s'expliquer par un changement de la dérive instrumentale d'une des deux composantes de l'inclinomètre. Après une légère hausse de la température des instruments entre fin 2020 et début 2021, celle-ci est maintenant stabilisée. Ces données ne montrent pas en 2022 de déformation claire de l'édifice de la Montagne Pelée associée à une intrusion ou au déplacement de magma en profondeur.



Rapport annuel 2022

Observatoire volcanologique et sismologique de Martinique - IPGP

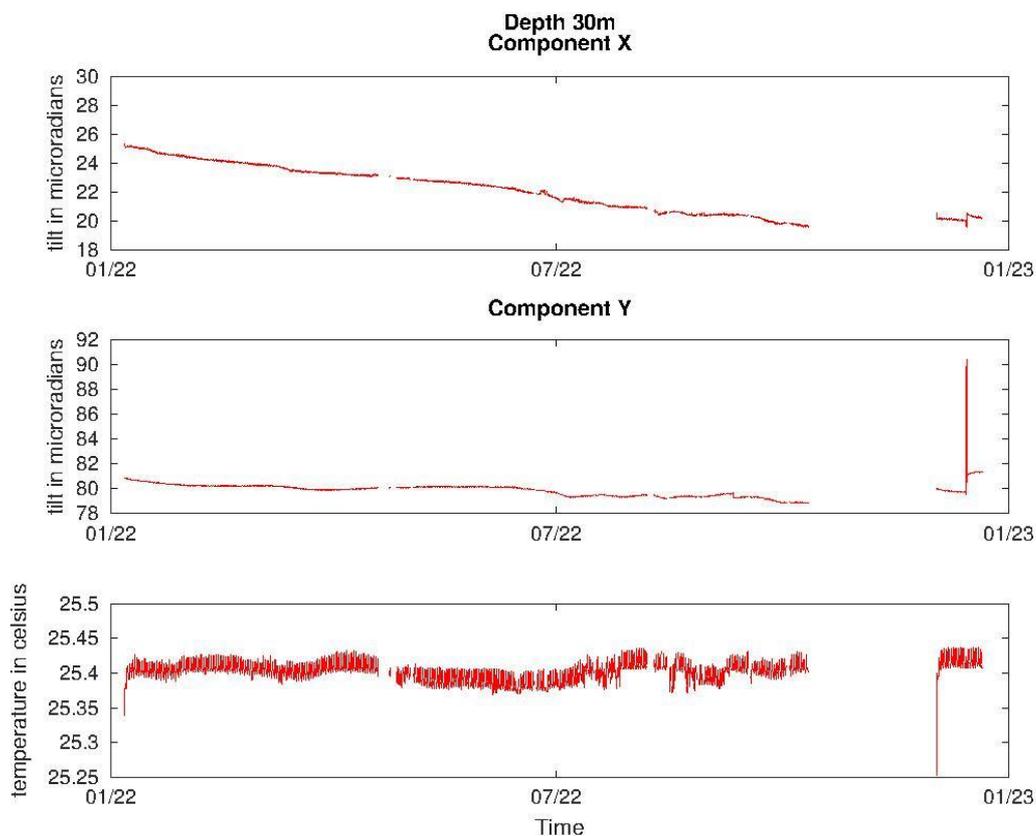


Figure 18. Inclinaison et température de l'instrument à 30 m de profondeur (données brutes non corrigées), du 1er janvier au 31 décembre 2022. La température est stable sur la période. La pente observée sur la composante X (en haut) est le résultat d'une dérive instrumentale caractéristique de ce type d'instruments.



Rapport annuel 2022
Observatoire volcanologique et sismologique de Martinique - IPGP

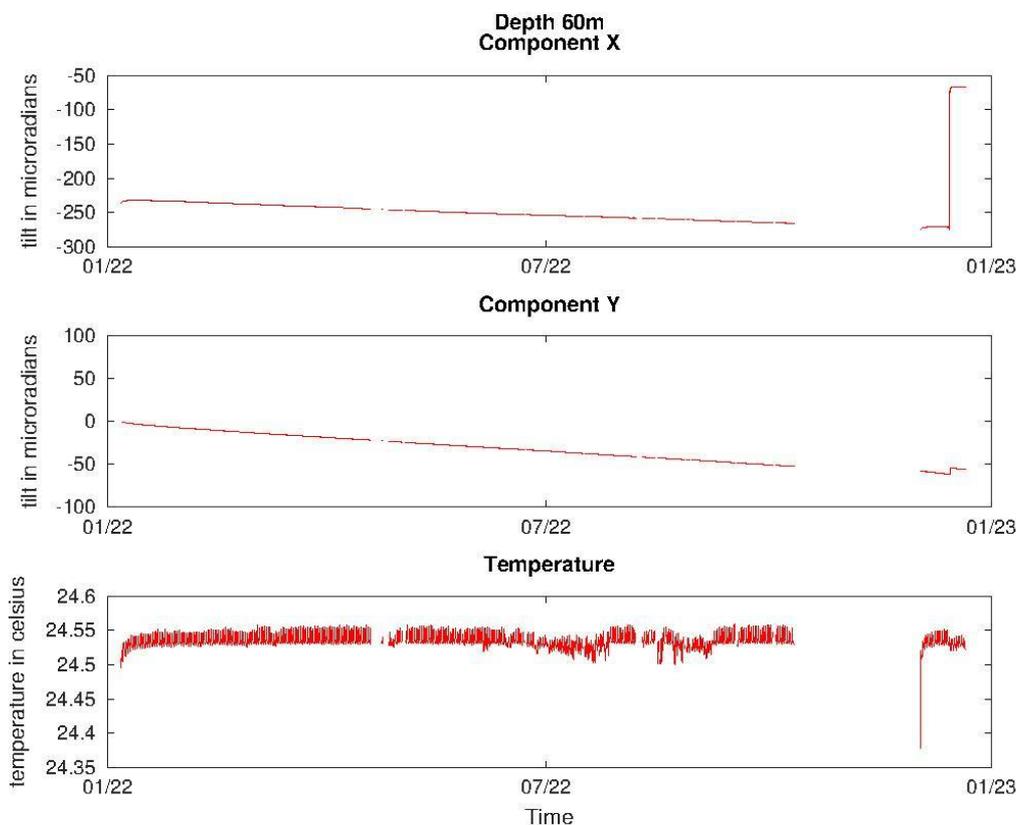


Figure 19. Inclinaison et température de l'instrument à 60 m de profondeur, du 1er janvier au 31 décembre 2022. La température est stable sur la période. La pente observée sur les composantes X (en haut) et Y (au centre) est le résultat d'une dérive instrumentale caractéristique de ce type d'instruments.

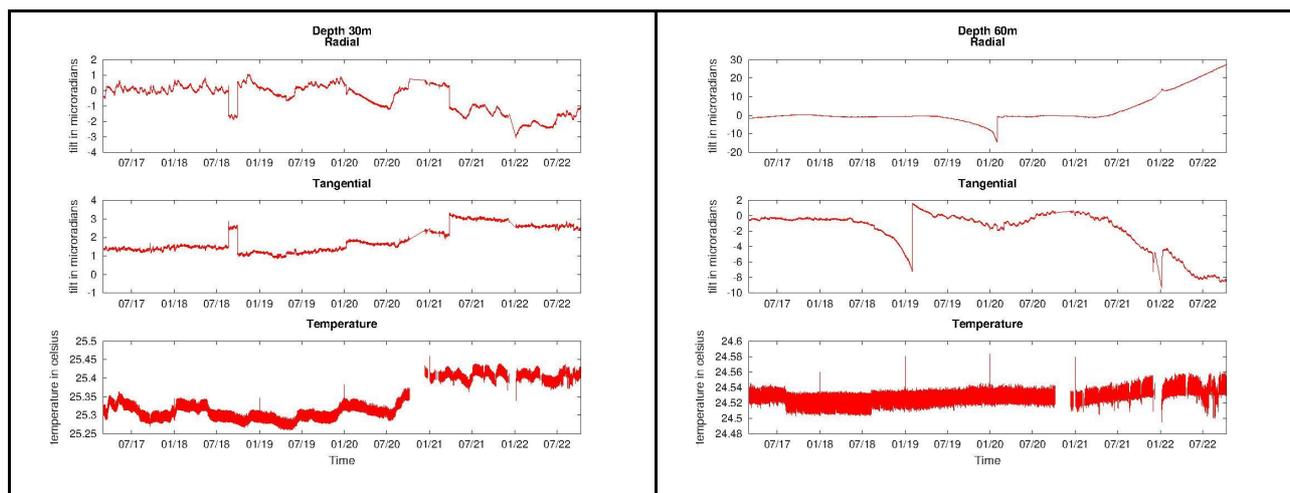


Figure 20. Inclinaison et température des deux instruments du 1er mars 2017 au 12 octobre 2022. Les données d'inclinaison sont corrigées des dérives instrumentales observées avant 2020 et placées dans un repère radial/tangentiel par rapport au sommet de la Montagne Pelée.



Suivi géochimiques des sources thermales de la Montagne Pelée et de la rivière du Prêcheur

Forage de Puits Chaud continu

La **Figure 21** illustre les mesures réalisées en continu lors de l'année 2022 au niveau du forage de Puits Chaud. La tension batterie reflète les variations d'ensoleillement au cours du temps. Le niveau d'eau (hauteur en mètres) dans le forage est relativement stable lorsque la valeur est disponible au cours de l'année 2022. La conductivité augmente relativement au cours de l'année, passant de 965 à 1183 $\mu\text{S}/\text{cm}$ à 8.5 m de profondeur. Les variations observées traduisent une variation du rapport eau douce/eau de mer dans le forage. La température des eaux (sonde PT1000) montre de faibles variations au cours de l'année avec des valeurs proches de 30°C. Des prélèvements manuels ont lieu par ailleurs chaque mois dans le forage de Puits Chaud et des mesures de température, pH et conductivité sont effectuées in situ. Les valeurs mesurées lors des prélèvements manuels sont cohérentes avec les observations continues.

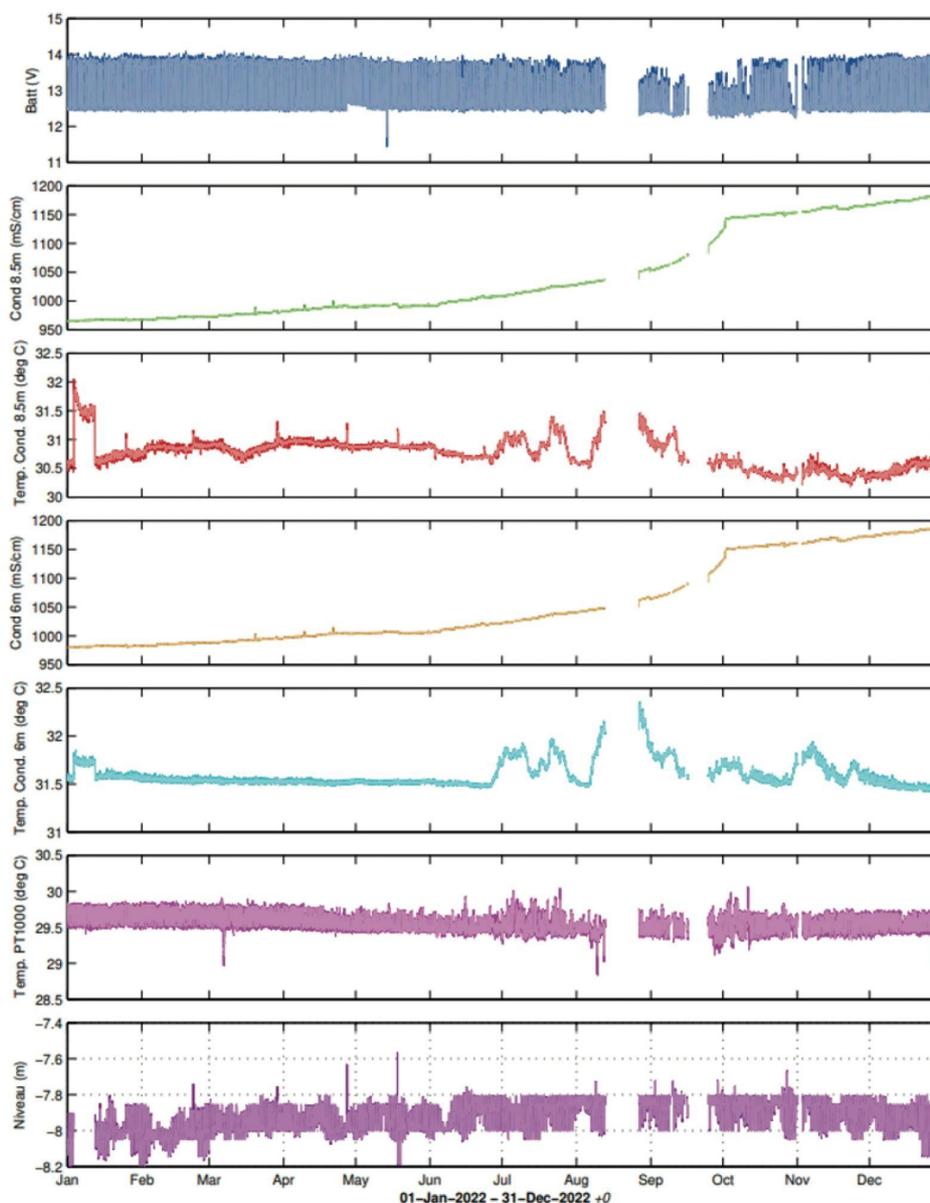


Figure 21. Mesures physico-chimiques réalisées en continu au forage de Puits Chaud en 2022 (source WebObs / OVSM).



Rapport annuel 2022

Observatoire volcanologique et sismologique de Martinique - IPGP

Les mesures réalisées mensuellement au forage de Puits Chaud en 2022 sont synthétisées dans le **Tableau 6** ci-dessous.

Mois	Jan	Fév	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil	Août	Sept	Oct	Nov	Déc
T°C	31.1	31.6	31.6	31.5	31.6	31.5	31.5	31.6	31.4	31.5	31.4	N.R
Cond. $\mu\text{S}/\text{cm}$	1275	1291	1308	1380	1315	1300	1265	1213	1203	1360	1247	N.R
pH	6.57	6.54	6.51	6.36	6.49	6.46	6.56	6.43	6.51	6.62	6.48	N.R
HCO ₃ -mg/L	415.18	420.3	390.58	395.77	419.37	395.73	407.93	391.93	404.50	400.88	419.37	N.R

Tableau 6. Mesures physico-chimiques réalisées au forage de Puits Chaud en 2022. *N.R (Non réalisé)

Forages des carrières FCR1 et FCR2

Depuis mai 2021, l'OVSM-IPGP mesure mensuellement les propriétés physico-chimiques des fluides présents au sein de deux autres forages : FCR1 Forage Carrière N°1 d'une profondeur de 50 m (accès par Morne Lénard), et FCR2 Forage Carrière N°2 d'une profondeur de 60 m (carrière Fond Canonville). Les résultats pour l'année 2022 sont présentés dans les **Tableaux 7 et 8**.

Mois	Jan	Fév	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil	Août	Sept	Oct	Nov	Déc
T°C	27.1	27.2	27.4	27.3	27.8	27.3	27.6	27.6	27.6	27.5	27.5	N.R
Cond. $\mu\text{S}/\text{cm}$	302	333	326	265	289	257	259	270	266	287	283	N.R
pH	6.85	6.90	6.66	6.92	7.13	6.80	7.09	6.78	6.89	7.51	6.70	N.R
HCO ₃ -mg/L	120.86	121.6	111.69	116.02	116.85	117.00	116.85	114.18	104.84	103.32	106.75	N.R

Tableau 7. Mesures physico-chimiques réalisées à FCR1 en 2022. *N.R (Non réalisé)

Mois	Jan	Fév	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil	Août	Sept	Oct	Nov	Déc
T°C	27	27.3	N.R	27.8	N.R	N.R	27.9	N.R	27.1	N.R	N.R	N.R
Cond. $\mu\text{S}/\text{cm}$	366	397	N.R	442	N.R	N.R	377	N.R	377	N.R	N.R	N.R
pH	6.88	6.94	N.R	6.76	N.R	N.R	6.99	N.R	6.95	N.R	N.R	N.R
HCO ₃ -mg/L	141.44	137.49	N.R	139.9	N.R	N.R	136.74	N.R	138.39	N.R	N.R	N.R

Tableau 8. Mesures physico-chimiques réalisées à FCR2 en 2022. *N.R (Non réalisé)

Rivière du Prêcheur

Les mesures réalisées mensuellement dans la rivière du Prêcheur en 2022 sont synthétisées dans le **Tableau 9** ci-dessous.

Mois	Jan	Fév	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil	Août	Sept	Oct	Nov	Déc
T°C	23.1	24.3	27.3	25	27.2	27.5	26.2	24.9	26.7	26.1	24	N.R
Cond. $\mu\text{S}/\text{cm}$	148.1	152	154.2	140.7	152.8	155.2	109	144.9	126.3	125.5	132.5	N.R
pH	8.01	8.27	8.30	8.03	8.21	7.94	8.16	7.83	8.15	8.30	7.94	N.R
HCO ₃ -mg/L	73.99	71.86	73.93	73.99	83.11	76.63	71.86	76.25	72.25	73.96	70.91	N.R

Tableau 9. Mesures physico-chimiques réalisées dans la rivière du Prêcheur en 2022. *N.R (Non réalisé)



Rapport annuel 2022

Observatoire volcanologique et sismologique de Martinique - IPGP

Sources chaudes et rivière Chaude

Les mesures réalisées en moyenne 4 à 6 fois par an aux Sources Chaudes et dans la rivière Chaude sont synthétisées pour l'année 2022 dans le **Tableau 10** ci-dessous.

Mois	Jan	Fév	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil	Août	Sept	Oct	Nov	Déc
SC4												
T°C	N.R	32.6	N.R	N.R	32.4	N.R	N.R	32.1	N.R	N.R	N.R	33.3
Cond. $\mu\text{S}/\text{cm}$	N.R	1196	N.R	N.R	1186	N.R	N.R	1142	N.R	N.R	N.R	1276
pH	N.R	6.11	N.R	N.R	5.92	N.R	N.R	5.96	N.R	N.R	N.R	5.97
HCO ₃ -mg/L	N.R	853.04	N.R	N.R	827	N.R	N.R	812.44	N.R	N.R	N.R	790.52
Rivière Chaude												
T°C	N.R	25	N.R	N.R	25.2	N.R	N.R	25.5	N.R	N.R	N.R	24.7
Cond. $\mu\text{S}/\text{cm}$	N.R	638	N.R	N.R	648	N.R	N.R	675	N.R	N.R	N.R	674
pH	N.R	7.50	N.R	N.R	7.28	N.R	N.R	7.19	N.R	N.R	N.R	7.51
HCO ₃ -mg/L	N.R	433.86	N.R	N.R	433.10	N.R	N.R	458.83	N.R	N.R	N.R	389.45

Tableau 10. Mesures physico-chimiques réalisées aux Sources Chaudes et dans la rivière Chaude en 2022. *N.R (Non réalisé)

Depuis septembre 2021, dans le cadre de la surveillance de la source N°4 (SC4), l'OVSM-IPGP a procédé à l'installation d'une sonde de température de type Tinytag permettant de faire le suivi en continu de la température de cette source (**Figure 22**).



Figure 22. Installation à la source SC4 (à gauche) et zoom sur la sonde Tinytag immergée (à droite). Photos OVSM-IPGP



Rapport annuel 2022

Observatoire volcanologique et sismologique de Martinique - IPGP



Figure 23. Suivi temporel de la température de la source SC4 enregistrée par une sonde Tinytag en 2022.

La **Figure 23** montre les résultats du suivi en continu de la température de la source SC4 en 2022. Les pics visibles début février, début mai, début août et mi-décembre 2022 correspondent à la manipulation de la sonde lors de la phase de récupération des données. L'absence de données entre fin mai et début août 2022 est liée à un problème de batterie interne.

Quatre prélèvements ont été effectués en 2022 au niveau d'une source de la rivière Chaude : en février, mai, août et décembre 2022. Certaines analyses en anions et en cations ont été réalisées, et d'autres sont toujours en cours en collaboration avec T. Labasque (Géosciences Rennes, OSUR, Univ de Rennes 1), le Centre de Recherches Pétrographiques Géochimiques (CRPG) de Nancy (Univ de Lorraine), l'OVSG et l'IPGP. Un enrichissement de la source SC4 en CO_2 et ^4He est toujours observé.

Forage du Prêcheur

Dans le cadre d'un suivi des forages autour de la Montagne Pelée débuté en 2021, l'OVSM-IPGP a enregistré en mars 2022 des valeurs de CO_2 au-dessus de la valeur standard atmosphérique avec quelques variations sur le forage de la rivière du Prêcheur. Des mesures de concentration en CO_2 ont été réalisées en mars, mai, juin et septembre 2022 à l'aide d'un capteur Dräger (**Figure 24**). Les résultats montrent une concentration allant à 45 000 ppm en CO_2 à l'intérieur du forage le 27 juin 2022 et 50 000 ppm en CO_2 (saturation du capteur) le 10 septembre 2022.

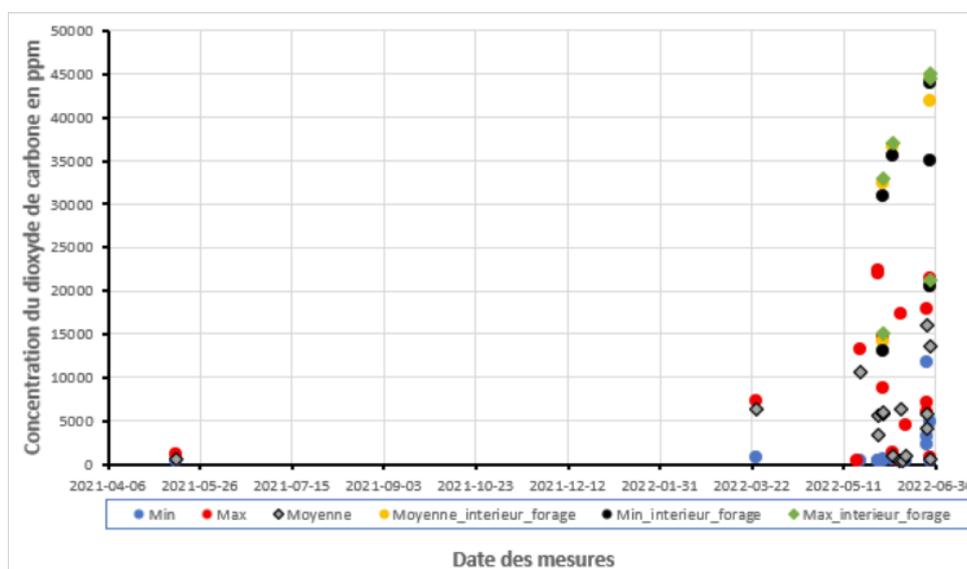


Figure 24. Concentration en CO_2 à l'intérieur du forage de la rivière du Prêcheur en mars 2021 (valeur standard) et entre mars et juin 2022.



Rapport annuel 2022

Observatoire volcanologique et sismologique de Martinique - IPGP

Dans le cadre du suivi du dégazage de la Montagne Pelée, l'OVSM-IPGP a fait l'acquisition en septembre 2022 d'une chambre d'accumulation WestSystems permettant de suivre les dégazages de CO_2 et H_2S dans le sol (**Figure 25**).

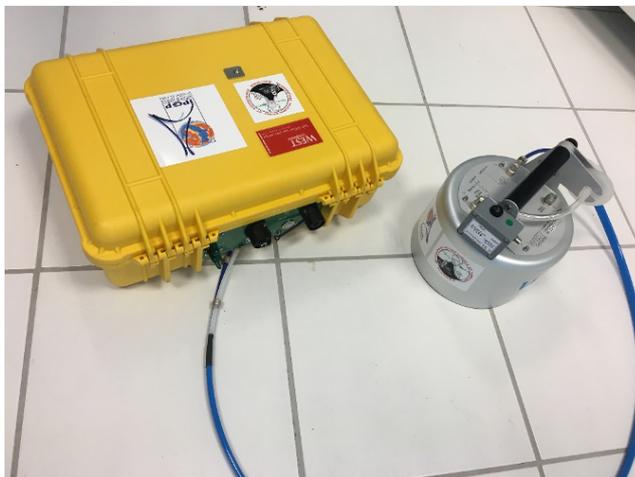


Figure 25. Chambre d'accumulation pour la mesure du gaz CO_2 et H_2S émis au niveau du sol. Photo OVSM-IPGP.

Bilan des mesures géochimiques du dégazage de la Montagne Pelée

En conclusion, on observe toujours un dégazage passif et diffus dans le sol de fluides magmatiques (CO_2 , He, S) à la Montagne Pelée, notamment sur les sites de végétation dégradée VEG1 à 4, et au forage de la rivière du Prêcheur. On observe néanmoins des variations récentes dans l'expression en surface de ce dégazage (cycles de dépérissement de la végétation) mais qui n'indique pas forcément une variation de l'apport profond.

Sur le long terme, l'apport de ces fluides et de la chaleur est globalement en décroissance (**Figure 26**), et aucune activité fumerolienne n'a été observée sur les flancs et au sommet de la Montagne Pelée en 2022.

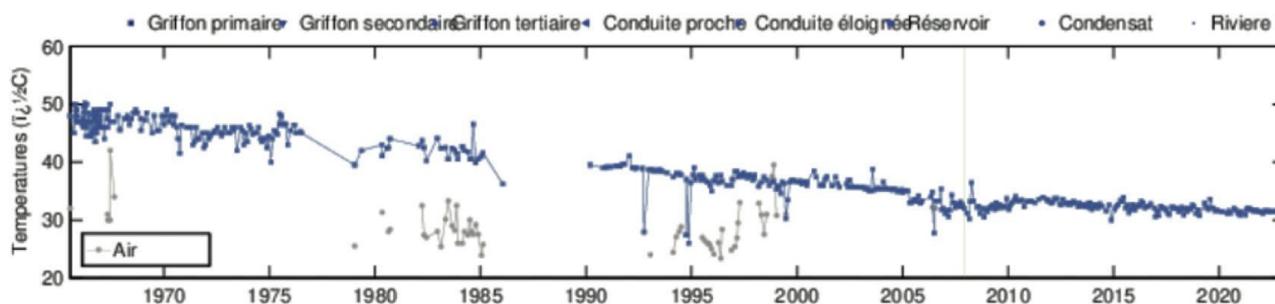


Figure 26. Décroissance de la température de Puits Chaud depuis 1965 (points bleus) (source WebObs / OVSM).



Glissements de terrain et lahars

Glissements de terrain

Les glissements de terrain et les lahars (terme d'origine indonésienne qui désigne une coulée boueuse, autre qu'un écoulement fluvial, à débris de roches volcaniques de toutes tailles, qui affecte les pentes des volcans) sont deux phénomènes liés à la vie du volcan, que ce soit en période éruptive ou en période de quiescence volcanique. Ces processus de pente jouent un rôle essentiel dans l'évolution des paysages en lissant les reliefs par le transfert continu (à l'échelle des temps géologiques) de matière des sommets vers le fond des vallées et en alimentant le réseau de drainage en sédiments. Leur étude et leur suivi en période calme permettent :

- D'identifier les zones potentiellement dangereuses lors des futures reprises d'activité ;
- De discriminer les signaux des glissements de ceux de l'activité hydrothermale ou volcano-tectonique à l'intérieur de l'édifice ;
- De mettre au point des techniques de suivi instrumental adaptées ;
- De participer aux recherches en cours sur les processus gravitaires ou sur les mécanismes de construction/destruction des édifices volcaniques.

Nous répertorions les glissements à partir des signaux sismiques du réseau de la Montagne Pelée. En 2022, nous avons ainsi observé au moins **148 éboulements (Figure 27)**.

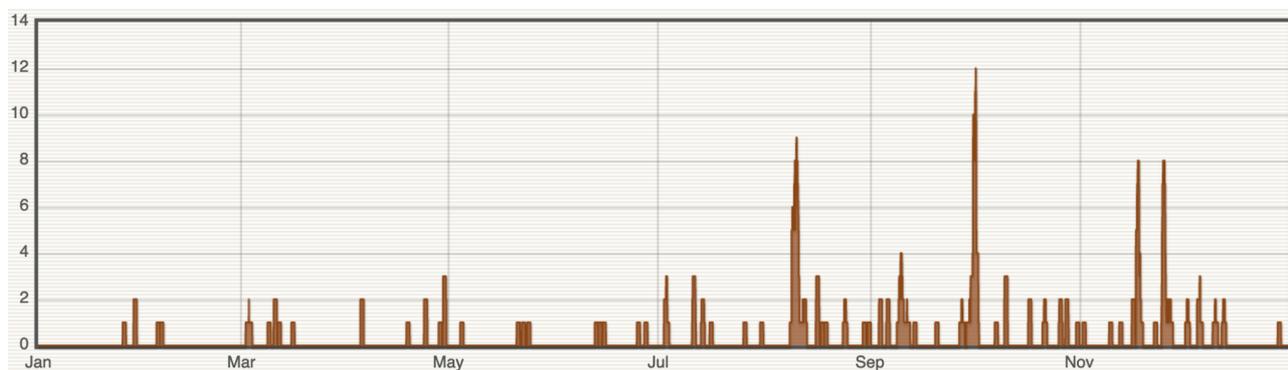


Figure 27. Distribution du nombre journalier d'éboulements dans le catalogue de l'OVSM IPGP pour l'année 2022 (source WebObs/OVSM).

La localisation des éboulements à partir des données sismiques est complexe. Deux principales raisons peuvent l'expliquer :

- Les ondes *P* et *S* ne sont pas clairement observables à partir des sismogrammes des éboulements car les ondes sismiques sont essentiellement des ondes de surface (Rousseau, 1999 ; Deparis et al., 2007) ;
- Il existe au moins deux sources distinctes : le rebond sur la paroi suite au détachement de la masse et l'impact au sol de cette masse après une phase de chute. Cela se traduit par le fait qu'une station proche enregistre bien les 2 signaux, alors qu'une station plus lointaine n'enregistre que la deuxième source, plus énergétique (e.g., Hibert, 2012 ; Yamada et al., 2013).

Pour le suivi spécifique des glissements de la falaise Samperre, nous avons installé en décembre 2010 au Morne Vert Pré un mât prévu pour recevoir un appareil photo. Depuis, des photos sont régulièrement prises depuis ce site, afin de suivre visuellement les glissements de la falaise Samperre. Par ailleurs, une survol hélicoptère avec le concours du D972 a été effectué avec le BRGM le 24 juin 2022 pour vérifier l'état d'érosion de la falaise Samperre, estimer la quantité de dépôts potentiellement remobilisables en pied de falaise et vérifier l'état des berges et du lit de la rivière du Prêcheur en amont de la saison cyclonique.



Rapport annuel 2022

Observatoire volcanologique et sismologique de Martinique - IPGP

Lahars

Les lahars, terme d'origine indonésienne qui désigne une coulée boueuse, autre qu'un écoulement fluviatile, à débris de roches volcaniques de toutes tailles, et qui affectent les pentes des volcans, sont des coulées boueuses qui peuvent être déclenchées par d'intenses et/ou de longs épisodes pluvieux remaniant d'importants volumes de sédiments présents dans le réseau hydrographique d'un volcan. Ils sont caractérisés par une forte concentration sédimentaire (plus de 50% en volume) et une granulométrie très étendue, allant du micron à des blocs de plusieurs mètres. Les lahars constituent une menace dès lors que des enjeux économiques, matériels et humains sont implantés sur les marges latérales d'un cours d'eau affecté par ce type d'écoulement. Ils ont un caractère imprévisible à la fois dans le temps et dans l'espace et possèdent une multitude de facteurs déclenchant, comme par exemple de fortes pentes, un stock sédimentaire mobilisable et l'occurrence de précipitations.

En 2022, l'OVSM-IPGP n'a pas identifié de **lahars** mais a enregistré **5 écoulements concentrés** sur les stations sismologiques et les géophones de ses réseaux, associés à des périodes de fortes pluies et de crues de la rivière du Prêcheur.

Activité volcanique de l'arc des Petites Antilles

La Soufrière de Guadeloupe : La dernière crise volcanique remonte à 1976-1977. Le niveau d'alerte volcanique actuel est **jaune**. Plus d'informations dans les bulletins de l'OVSG : <https://www.ipgp.fr/communiqués-et-bulletins-de-l'observatoire>

La Soufrière de Montserrat : L'île de Montserrat est située à 55 km au nord-ouest de la Guadeloupe. Le niveau d'alerte actuel du volcan est 1 sur une échelle de 0 à 5. L'accès à la zone V du volcan, comprenant la ville de Plymouth, est interdit. Les zones maritimes Est et Ouest peuvent être traversées, mais sans s'arrêter et uniquement pendant la journée, entre l'aube et le coucher du soleil. Plus d'informations sur le site du Montserrat Volcano Observatory (MVO) : http://www.mvo.ms/pub/Activity_Reports/.

La Soufrière de Saint Vincent et les Grenadines : Ce volcan est situé à une distance de 120 km au sud de la Martinique sur l'île de Saint-Vincent-et-les-Grenadines. Une éruption de type effusive avec formation d'un dôme de lave s'est produite du 29 décembre 2020 au 9 avril 2021. Une activité explosive commence le 9 avril. Aucune explosion n'est observée depuis le 22 avril. Le 7 mai 2021, le niveau d'alerte est passé à orange. Puis, ce niveau a atteint le jaune le 15 septembre 2021. Depuis, le 16 mars 2022, le niveau d'alerte est **vert**. L'échelle de couleurs utilisée pour ce volcan a été réalisée pour des éruptions explosives. Plus d'informations sur le site du National Emergency Management Organisation (NEMO) de Saint-Vincent-et-les-Grenadines :

<http://www.nemo.gov.vc/nemo/>

et du Seismic Research Center (SRC) :

<http://www.uwiseismic.com>

Kick'em Jenny : C'est un volcan sous-marin situé à 8 km au nord de Grenade. La dernière éruption sous-marine s'est produite le 29 avril 2017. Le niveau de vigilance actuel est **jaune** (deuxième niveau sur une échelle de couleurs en comportant quatre). Une zone d'exclusion de 5 km autour du sommet (180 m sous la surface de la mer) est conseillée par sécurité. Plus d'informations sur le site du Seismic Research Center (SRC) :

<http://www.uwiseismic.com>



Activité locale et régionale

Contexte tectonique

L'arc insulaire des Petites Antilles résulte du plongement des plaques tectoniques Nord et Sud-Américaines sous la plaque Caraïbe. Ce phénomène, appelé subduction, a lieu à une vitesse d'environ 2 cm/an et est à l'origine de la majorité des séismes tectoniques de l'arc, faisant des Petites Antilles une région à fort aléa sismique (**Figure 28**). La Martinique et la Guadeloupe sont les deux seules régions françaises classées en zone 5 (sismicité maximale du zonage français). Plusieurs séismes majeurs, d'intensité supérieure ou égale à VII, ont touché la Martinique depuis le XIX^{ème} siècle (**Figure 28**) :

- ❖ 30 novembre **1827** : intensité VII-VIII, épicentre à l'est de la Martinique (magnitude ~7) ;
- ❖ 11 janvier **1839** : intensité VIII-IX (la moitié de la ville de Fort-Royal est détruite, 317 morts officiels mais vraisemblablement plusieurs milliers), séisme majeur de subduction situé à l'est de la Caravelle (magnitude ~7.5) ;
- ❖ 8 février **1843** : intensité VII en Martinique (maisons lézardées), séisme majeur de subduction situé au nord-est de la Guadeloupe (magnitude > 8) ;
- ❖ 16 février **1906** : intensité VII en Martinique (maisons lézardées, 5 blessés à Rivière Salée), épicentre au large de Sainte-Lucie (magnitude ~7) ;
- ❖ 21 mai **1946** : intensité VII-VIII (1 mort et dégâts importants au Lorrain, une vingtaine de blessés en Martinique), épicentre situé à l'est de la Martinique (magnitude ~7) ;
- ❖ 19 mars **1953** : intensité VII (3 blessés, dégâts dans plusieurs communes) épicentre situé au large de Sainte-Lucie (magnitude ~7.5) ;
- ❖ 29 novembre **2007** à 19h00 TU (15h00 en heure locale): intensité V-VII (dégâts dans plusieurs communes), épicentre situé à 30 km au nord de la Martinique à 152 km de profondeur (magnitude 7.4).

Une grande partie des séismes d'origine tectonique provient de la zone *inter-plaque* à l'est de l'arc antillais, à l'endroit où les plaques tectoniques entrent en interaction (**Figure 29**). Ils se situent à des profondeurs de quelques kilomètres à quelques dizaines de kilomètres, et peuvent atteindre de fortes magnitudes. D'autres séismes proviennent de ruptures de la plaque plongeante après qu'elle soit entrée en subduction, et ont lieu à des profondeurs intermédiaires aux alentours de 100 à 150 km de profondeur. D'autres encore, plus superficiels et souvent de magnitudes faibles, résultent de la déformation de la plaque Caraïbe (*intra-plaque*) ou Amérique avant son entrée en subduction ("*outer-rise*").

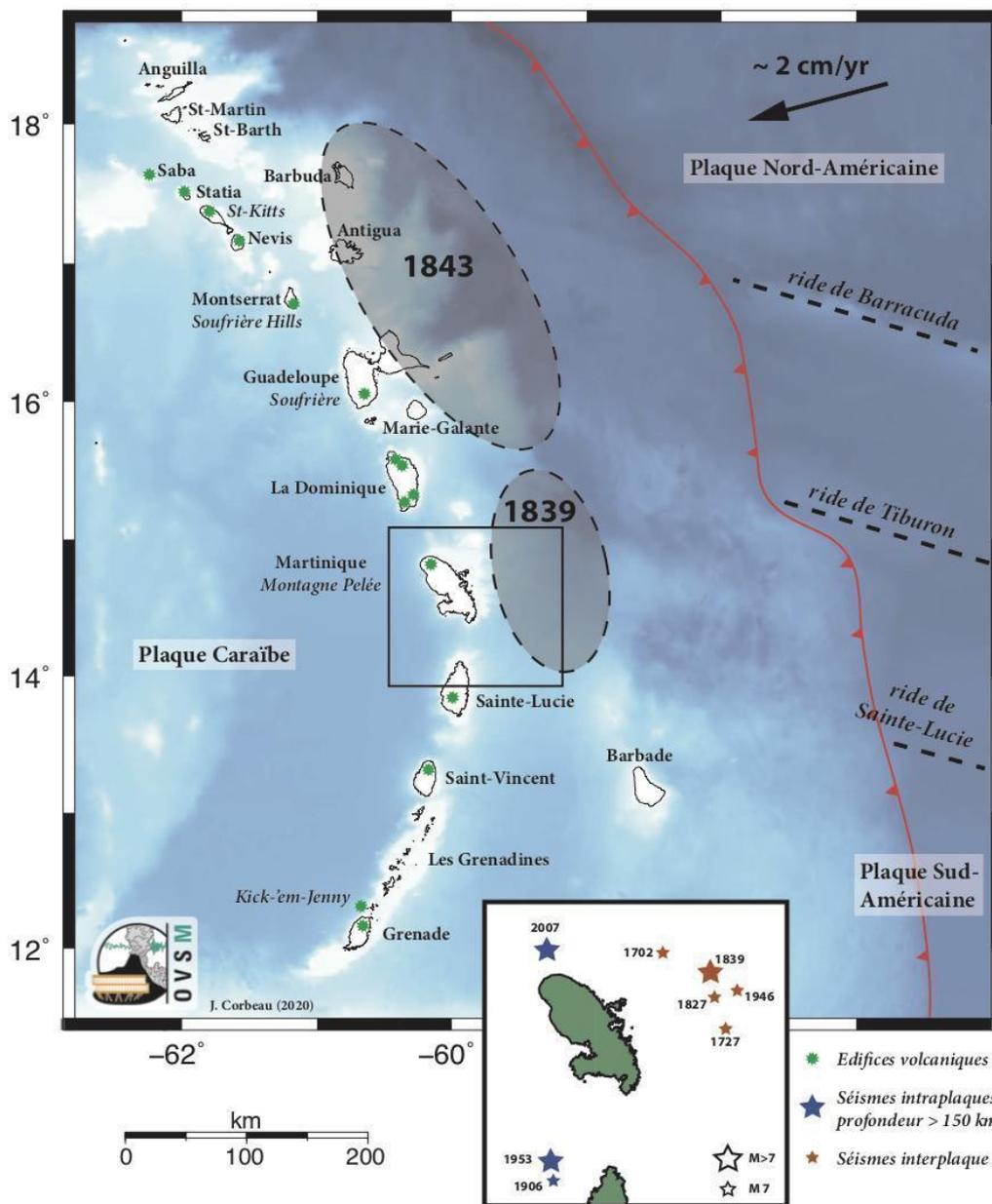


Figure 28. Contexte tectonique de l'arc volcanique des Petites Antilles. Les plaques tectoniques Nord-Américaine et Sud-Américaine entrent en subduction sous la plaque Caraïbe à une vitesse d'environ 2 cm/an. Les étoiles vertes indiquent la localisation des volcans. Les ellipses grises indiquent les zones de ruptures estimées pour les deux séismes historiques majeurs de 1839 et 1843. L'encadré en bas de la figure précise les localisations des séismes historiques de magnitude estimée supérieure à 7 répertoriés comme ayant été ressentis en Martinique (d'après Feuillet et al., 2011).

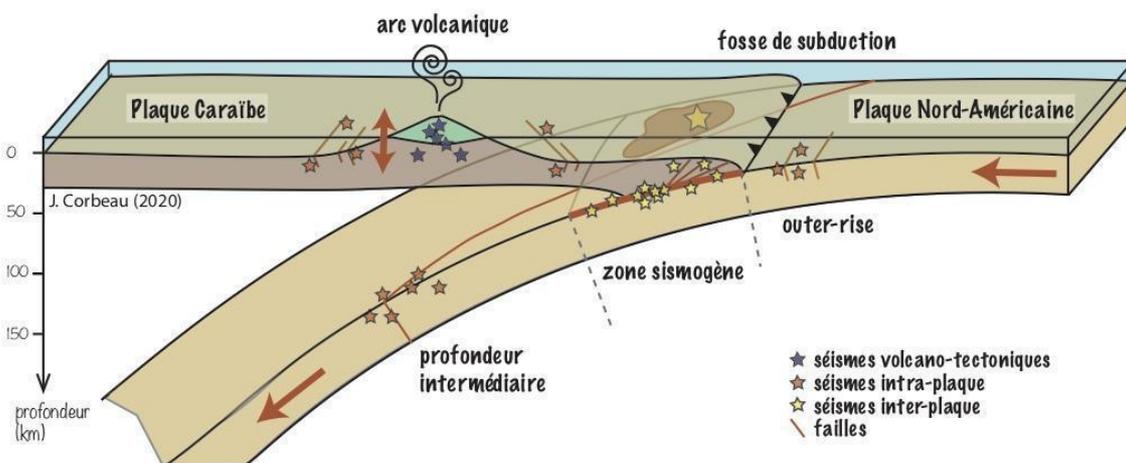


Figure 29. Schéma conceptuel de la zone de subduction des Petites Antilles vue en fonction de la profondeur. Les étoiles de couleur indiquent les différents types de séismes enregistrés en Martinique.

Activité sismo-tectonique

L'enregistrement et le prétraitement automatique de la sismicité ont lieu à l'OVSM 24h/24. Les données acquises par les réseaux de stations sismologiques sont enregistrées en temps réel, stockées localement, synchronisées avec l'IPGP à Paris, et traitées quotidiennement par les analystes de l'OVSM. Après traitement, les événements sismiques et leurs caractéristiques sont listés dans une main courante (catalogue dans lequel est consigné l'ensemble des événements identifiés) et proviennent soit d'événements détectés par les programmes de traitement automatiques et validés par les analystes, soit d'événements repérés visuellement sur les données numériques par les analystes.

Au cours de l'année 2022, l'OVSM-IPGP a identifié **985 séismes d'origine tectonique** régionaux au niveau de l'arc des Petites Antilles et **150 télé-séismes** (séismes lointains dont les hypocentres sont situés à plus de 3000 km des réseaux sismologiques et dont la magnitude est supérieure à 5). Les hypocentres de **655 séismes d'origine tectonique** ont pu être déterminés par les analystes de l'OVSM (**Figure 30**). Les localisations des séismes qui se situent à proximité des îles sont relativement bien contraintes par le réseau local ou régional (positions à +/- quelques kilomètres). Pour les séismes plus lointains, la géométrie du réseau lié à l'alignement Nord-Sud des îles peut engendrer des incertitudes plus grandes de l'ordre de la dizaine de kilomètres.



Rapport annuel 2022
Observatoire volcanologique et sismologique de Martinique - IPGP

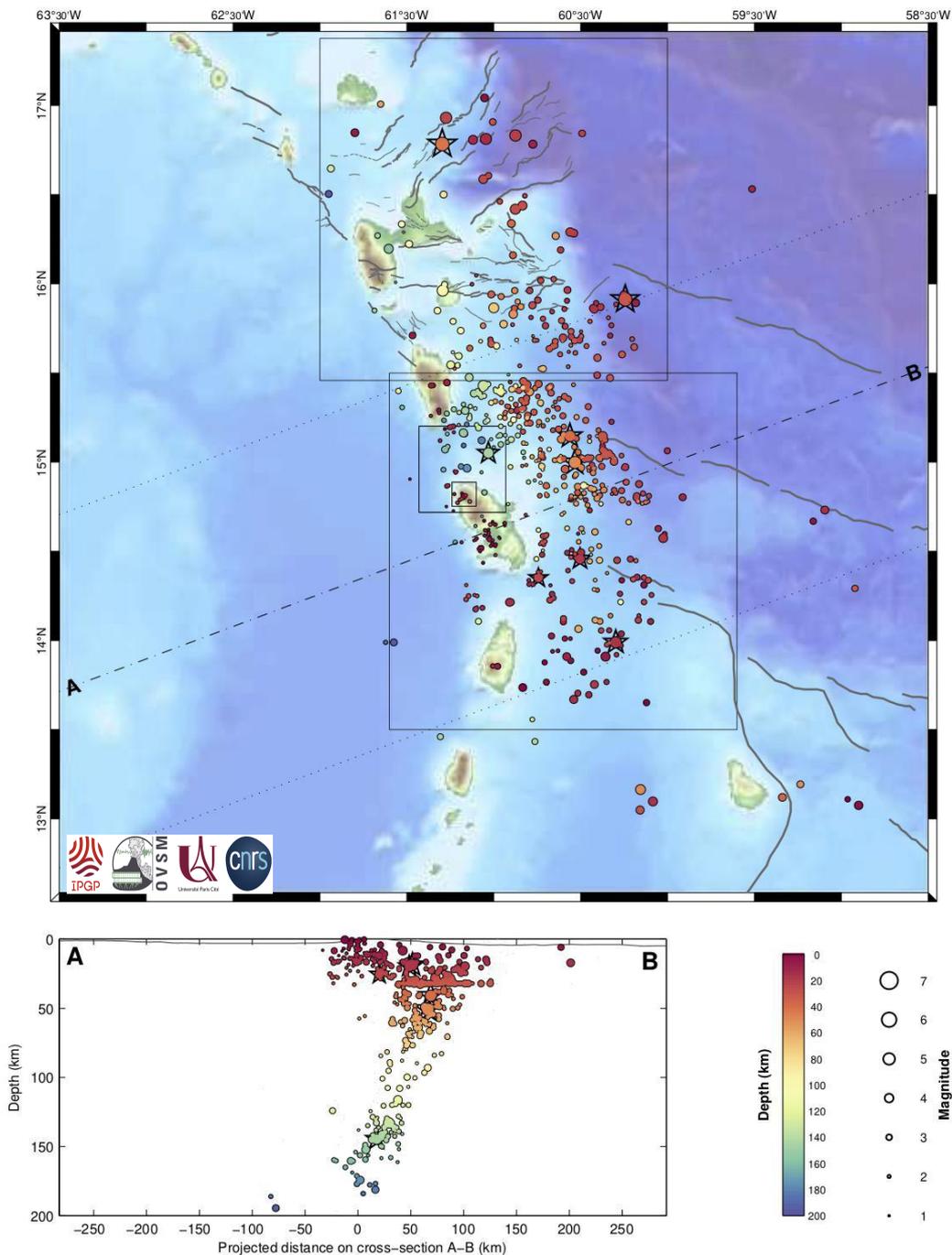


Figure 30. Partie supérieure : carte des épicentres des séismes enregistrés et localisés par l'OVSIM-IPGP au cours de l'année 2022 sur l'arc Antillais. Partie inférieure : représentation des hypocentres des séismes en fonction de la profondeur, suivant le profil A-B indiqué sur la carte. Les étoiles représentent les séismes ressentis en Martinique (source WebObs/OVSIM).

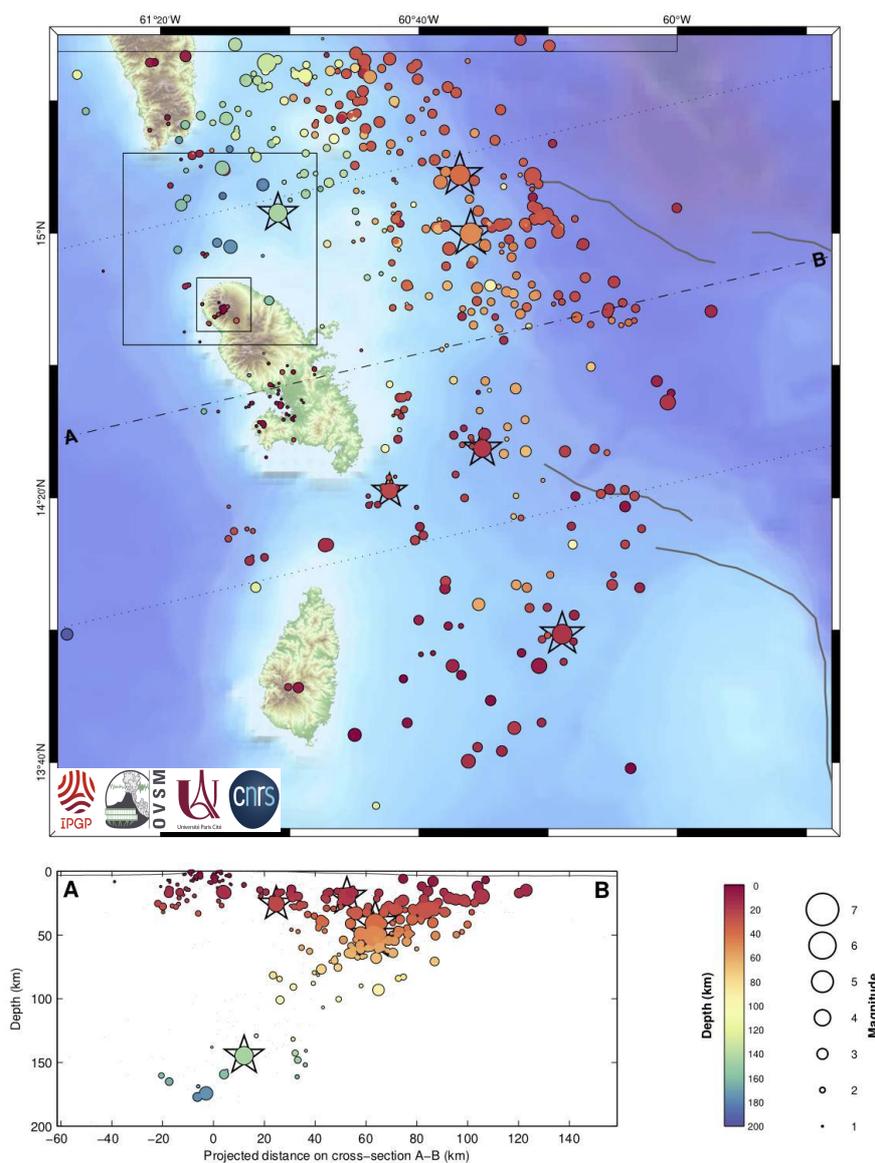


Rapport annuel 2022

Observatoire volcanologique et sismologique de Martinique - IPGP

En 2022, la sismicité régionale enregistrée autour de la Martinique est principalement liée à (**Figure 31**) :

- ❖ L'activité présente au nord de la Martinique qui a commencé avec une secousse de magnitude 7.4 le 29 novembre 2007, et qui se poursuit encore aujourd'hui avec des séismes de profondeur intermédiaire (entre 100 et 150 km, en bleu et en vert sur la **Figure 31**) dans le canal de la Dominique ;
- ❖ Un essaim de séismes *inter-plaque* à l'est-nord-est de la Martinique et à l'est-nord-est de Sainte-Lucie, au niveau de l'interface de subduction entre la plaque Caraïbe et la plaque Nord-Américaine (en rouge et en orange sur la **Figure XX**). C'est dans cette zone que se trouvent en moyenne un tiers des séismes ressentis en Martinique. Cette zone correspond à la zone de rupture du séisme historique de 1839 (**Figure 31**).
- ❖ Une activité sismique superficielle *intra-plaque* au niveau de failles tectoniques qui structurent la plaque Caraïbe, notamment en Martinique et dans le canal de Sainte-Lucie (en rouge sur la **Figure 31**).





Rapport annuel 2022

Observatoire volcanologique et sismologique de Martinique - IPGP

Sismicité ressentie

Au cours de l'année 2022, l'observatoire a enregistré et localisé une moyenne de **55 séismes** tectoniques régionaux par mois, dont certains ont pu être ressentis par la population en fonction de leur localisation.

Lors d'un séisme fort, un SMS d'alerte est envoyé automatiquement vers le téléphone portable de la personne d'astreinte volontaire. Si ce message d'alerte est associé à au moins deux témoignages indépendants de personnes ayant ressenti la secousse, la personne d'astreinte prévient le SIDPC et procède immédiatement au traitement des données afin de localiser le séisme et de calculer sa magnitude. Elle émet ensuite un bulletin d'information (appelé B³) qui contient les caractéristiques du séisme et une carte indiquant les intensités prédites pour chaque commune de Martinique. Ce bulletin est à destination des autorités, des scientifiques des autres centres de surveillance régionaux, des médias, des abonnés à nos listes de diffusion, et du BCSF, qui crée alors une page sur son site web www.franceseisme.fr afin de déclencher la collecte de témoignages.

En 2022, il y a eu **8 séismes ressentis** en Martinique (représentés par les étoiles sur les **Figures 30 et 31**), de rarement ressenti à largement ressenti (intensité I-II à IV) :

- ❖ le **16 janvier 2022** à 04h32 heure locale, magnitude **M_{IV} 4.2**, profondeur 20 km, à environ 38 km à l'est du Vauclin (intensité maximale IV) ;
- ❖ le **15 février 2022** à 04h02 heure locale, magnitude **M_{IV} 5.3**, profondeur 43 km, à environ 40 km au nord-est de la Guadeloupe (intensité maximale IV) ;
- ❖ le **21 février 2022** à 14h12 heure locale, magnitude **M_{IV} 4.6**, profondeur 41 km, à environ 62 km à l'est-nord-est de Sainte-Marie (intensité maximale II-III) ;
- ❖ le **8 mars 2022** à 09h56 heure locale, magnitude **M_{IV} 4.6**, profondeur 19 km, à environ 80 km au sud-est de Sainte-Anne (intensité maximale III-IV) ;
- ❖ le **21 avril 2022** à 15h30 heure locale, magnitude **M_{IV} 4**, profondeur 145 km, à environ 22 km au nord-est de Basse-Pointe (intensité maximale I-II) ;
- ❖ le **16 juillet 2022** à 20h11 heure locale, magnitude **M_{IV} 4.8**, profondeur 51 km, à environ 54 km à l'est-nord-est de Trinité (intensité maximale IV) ;
- ❖ le **10 septembre 2022** à 22h22 heure locale, magnitude **M_{IV} 5.3**, profondeur 32 km, à environ 98 km à l'est-sud-est de la Guadeloupe (intensité maximale III-IV) ;
- ❖ le **9 octobre 2022** à 12h30 heure locale, magnitude **M_{IV} 3.8**, profondeur 26 km, à environ 18 km à l'est-sud-est de Sainte-Anne (intensité maximale IV).

Ces séismes sont principalement situés dans la zone *inter-plaque* de la subduction (zones des séismes historiques de 1839 et 1843) ainsi que dans la zone de profondeur intermédiaire pour le séisme du 21 avril 2022 (zone du séisme de 2007) et dans la zone *intra-plaque* de la plaque Caraïbe pour les séismes du 16 janvier, du 8 mars et du 9 octobre 2022.

Pour comparaison, en 2021, 5 séismes tectoniques ont été ressentis en Martinique. Le plus fort, de **M_{IV} 6**, a eu lieu le **26 mars 2021** à 00h51 heure locale au large de la Guadeloupe, à environ 24 km de profondeur (zone *inter-plaque*).

Le **Tableau 11** indique le nombre de séismes ressentis en Martinique chaque année dans la zone *inter-plaque* de la subduction, dans la zone de profondeur intermédiaire de la zone de subduction, et dans la partie superficielle de la croûte Caraïbe (zone *intra-crustale*) depuis l'an 2000. En moyenne, **9.3** séismes sont ressentis chaque année.



Rapport annuel 2022
Observatoire volcanologique et sismologique de Martinique - IPGP

Année	Nombre de séismes ressentis				Année	Nombre de séismes ressentis			
	Zone inter-plaque	Zone de profondeur intermédiaire	Zone intra-crustale	Total		Zone inter-plaque	Zone de profondeur intermédiaire	Zone intra-crustale	Total
2000	5	-	1	6	2011	8	1	-	9
2001	2	1	1	4	2012	5	2	3	10
2002	4	2	-	6	2013	4	1	1	6
2003	3	2	1	6	2014	7	3	2	12
2004	9	-	2	11	2015	8	6	1	15
2005	3	1	3	7	2016	11	4	1	16
2006	6	1	4	11	2017	6	-	-	6
2007	8	7	-	15	2018	10	1	-	11
2008	7	-	2	9	2019	12	1	2	15
2009	7	-	1	8	2020	3	3	-	6
2010	6	3	2	11	2021	4	-	1	5
					2022	4	1	3	8

Tableau 11. Évolution du nombre de séismes ressentis en Martinique par année dans les différentes zones de rupture de la subduction des Petites Antilles depuis l'an 2000. La moyenne est de **9.3** séismes ressentis par an.



Déformation régionale

Les vecteurs de déplacement à l'échelle de la Martinique, calculés à partir des mesures réalisées sur les deux dernières années, sont représentés sur la **Figure 32**. Ces vecteurs de déplacement reflètent bien la dynamique de la tectonique régionale à l'échelle de la plaque Caraïbe, avec un déplacement d'environ 2 cm/an vers le nord-est.

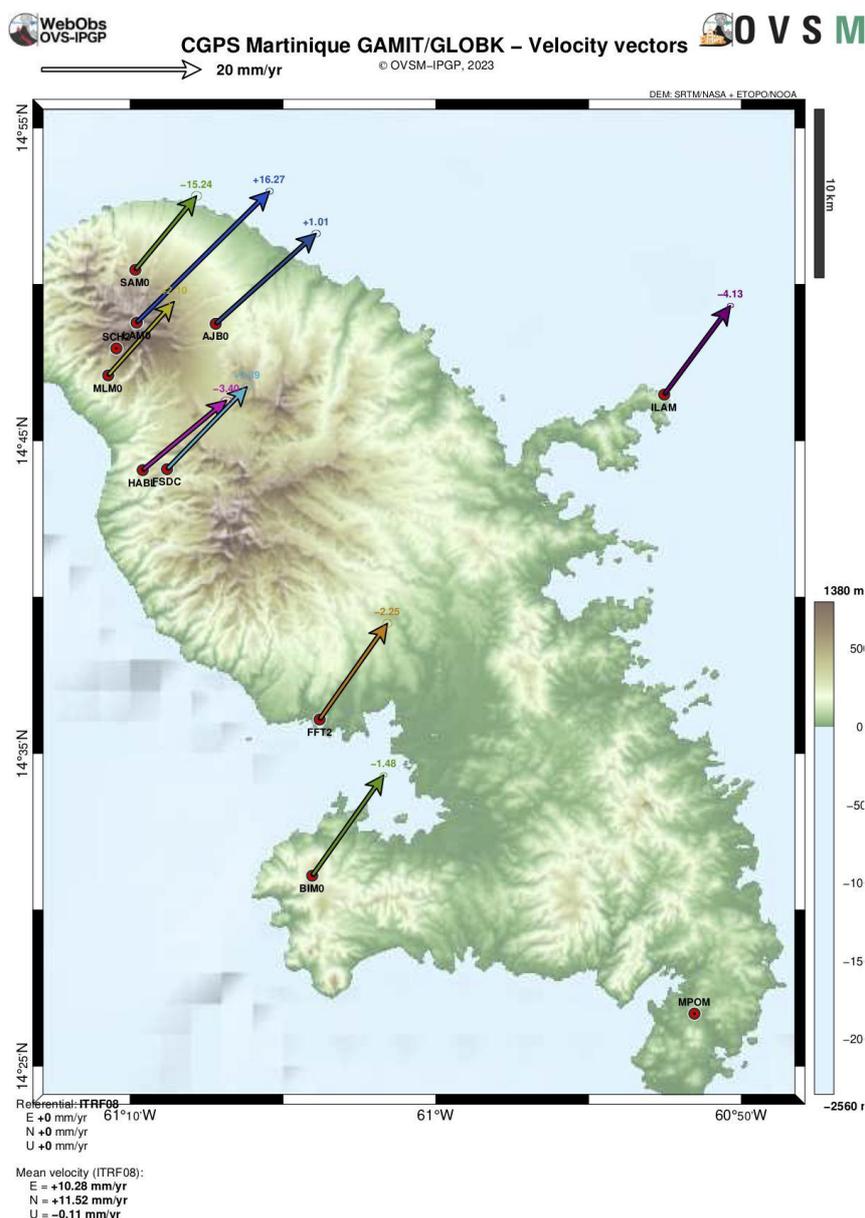


Figure 32. Vecteurs de déplacement calculés à partir des deux dernières années (2021 et 2022) de mesures du réseau GNSS de l'OVSM-IPGP. La taille des vecteurs représente la vitesse de déplacement en mm/an, et la flèche indique le sens du déplacement par rapport à la plaque Nord-Américaine (source WebObs/OVSM).



Réseaux de surveillance et d'études

Les réseaux de surveillance de l'OVSM-IPGP comprennent plus d'une cinquantaine de capteurs transmettant pour la majorité leur données en temps réel directement à l'observatoire par télécommunication. Ces réseaux de surveillance permettent l'étude de paramètres géophysiques via des sismomètres qui enregistrent la vitesse de déplacement du sol, des accéléromètres qui enregistrent l'accélération du sol, des inclinomètres et des GPS permanents ou de répétition qui détectent la déformation du sol. D'autres capteurs permettent aussi le suivi de paramètres géochimiques via des prélèvements réguliers sur différents exutoires de sources thermales ou encore de phénomènes liés à l'édifice volcanique.

L'ensemble de ces réseaux permet de couvrir les domaines d'études suivants :

- ❖ La surveillance de l'activité de la Montagne Pelée
- ❖ La caractérisation de la sismicité d'origine tectonique à l'échelle locale et régionale
- ❖ L'étude des mouvements forts (macro-sismicité)
- ❖ Le suivi des déformations d'origine tectonique

En 2022, tous réseaux confondus, le nombre de stations actives permanentes gérées par l'OVSM-IPGP s'élève à près de 60 stations (mono ou multi paramètres). Elles sont réparties sur l'ensemble de la Martinique avec une densité plus importante autour de la Montagne Pelée. Le **Tableau 12** récapitule l'évolution des réseaux au cours des deux dernières années.

Ce nombre est accru lors des campagnes de mesures ponctuelles (GPS de répétition, campagnes de mesures, etc) ou lors d'installation de stations temporaires pour la surveillance d'un phénomène particulier. En 2021, 3 stations large-bande temporaires avaient été installées autour de la Montagne Pelée afin de densifier le réseau permanent. En 2022, 2 d'entre elles ont été installées et 1 est encore active.

Réseau	Stations en 2021	Stations en 2022	En résumé
Sismologique et Accélérométrie	4 VSAT Multiparamètres 1 Très Large-Bande 8 Large-Bande Montagne Pelée 1 Courte-Période Montagne Pelée 3 Large-Bande Temporaires Montagne Pelée	4 VSAT Multiparamètres 1 Très Large-Bande 9 Large-Bande Montagne Pelée 1 Courte-Période Montagne Pelée 1 Large-Bande Temporaire Montagne Pelée	Extension du réseau permanent large-bande (+1) Réseau accélérométrie inchangé
Déformation	13 Permanentes (dont 7 Montagne Pelée) 20 Points de Répétition	14 Permanentes (dont 8 Montagne Pelée) 22 Points de Répétition	Extension du réseau permanent Montagne Pelée
Géochimique	5 Points de mesures 1 Station continue	5 Points de mesures 1 Station continue	

Tableau 12. Récapitulatif de l'évolution des réseaux de surveillance de Martinique maintenus par l'OVSM-IPGP entre 2021 et 2022.

Le réseau sismologique régional

Les réseaux de sismomètres large-bande permettent l'enregistrement à grande distance des ondes sismiques générées par les grands tremblements de terre. Ils permettent de mener des études sismologiques dans des domaines de fréquence non pris en compte par les sismomètres courte-période (tenseur des moments, tomographie, fonctions récepteur, etc). Toutes les ondes sont enregistrées, en particulier celles qui traversent la terre (ondes de volume) et qui servent à étudier sa structure interne. On les appelle large-bande car ils détectent des ondes qui, à grande distance, ont de longues périodes de vibration.



Rapport annuel 2022

Observatoire volcanologique et sismologique de Martinique - IPGP

A l'OVSM, les réseaux sismologiques régionaux large-bande utilisés pour la caractérisation de la sismicité régionale s'étendent des îles de Saint Martin et de Saint Barthélemy au nord de l'arc des Petites Antilles jusqu'à l'île de Tobago au sud (**Figure XX**). Des échanges de données ont lieu depuis plusieurs années entre l'OVSM en Martinique, l'OVSG en Guadeloupe et le Seismic Research Centre (SRC-UWI) basé à Trinidad et Tobago.

Grâce à un HUB de réception localisé à l'ancien observatoire – sur le Morne Moustin, les analystes de l'OVSM utilisent en temps réel les données transmises par voie satellitaire des stations de l'OVSG (réseau **WI**), du SRC (réseau **TR**), de 3 stations néerlandaises du KNMI (réseau **NA**) et de 3 stations de l'USGS (réseau **CU**) co-opérées par le SRC-UWI pour le travail de localisation de la sismicité régionale (**Figure 33**).

Les données des 4 stations sismologiques à transmission satellitaire basées en Martinique et appartenant au réseau **WI** (West-Indies) sont partagées en temps-réel par le même biais (**SAM, ILAM, BIM et MPOM**), et contribuent à l'alerte montante du système de surveillance des tsunamis de la Caraïbe (SATCAR).

Un sismomètre à très large bande faisant partie du réseau mondial GéoScope (**G**) est installé dans la cave sismique de l'observatoire (**FDFM**, destiné principalement à enregistrer les séismes lointains - *télé-séismes* - de grande magnitude). Les données sont accessibles à la communauté scientifique par le réseau Internet. Il contribue aussi au système de surveillance des tsunamis de la Caraïbe (SATCAR).

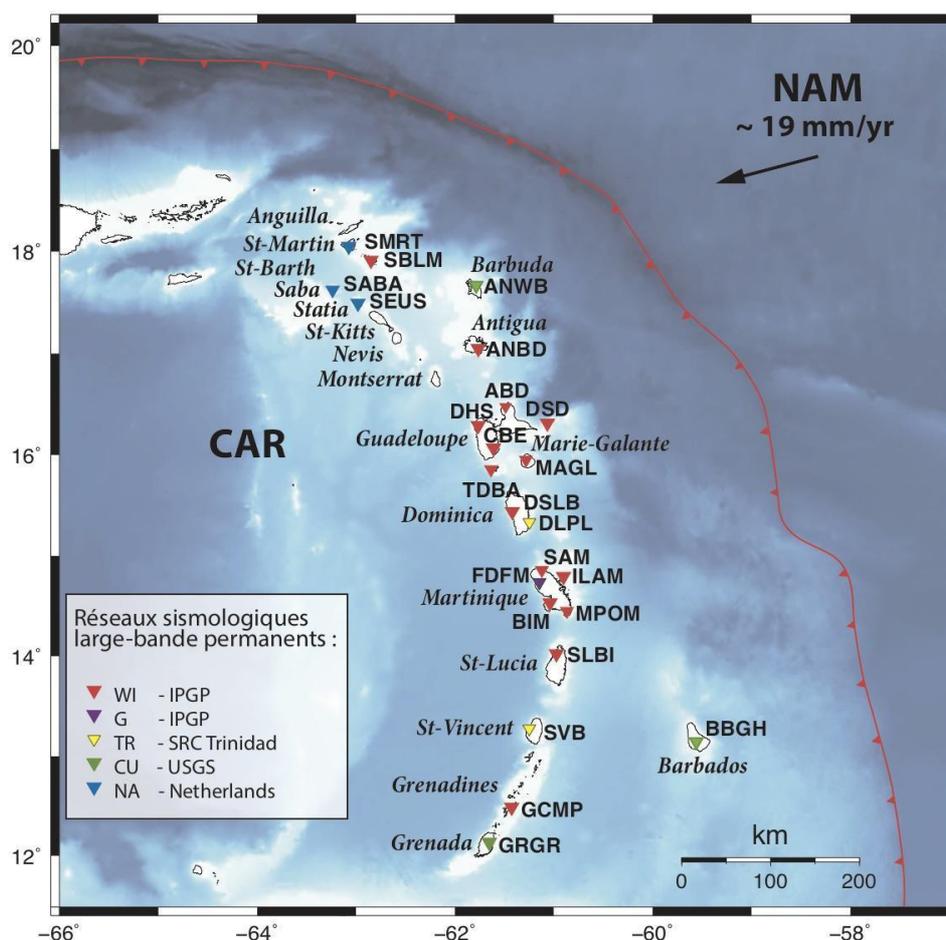


Figure 33. Localisations des stations sismologiques des réseaux régionaux permanents utilisés à l'OVSM-IPGP (WI, G, TR, CU et NA) pour la caractérisation de la sismicité régionale à l'échelle de l'arc des Petites Antilles (modifié d'après Corbeau et al., 2021).



Rapport annuel 2022

Observatoire volcanologique et sismologique de Martinique - IPGP

Le réseau sismologique de Martinique

Le réseau local de Martinique (**MQ**) est composé en 2022 de **14** stations sismologiques qui permettent la caractérisation de la sismicité locale (**Figure 34**) et qui viennent densifier les réseaux **WI** (4 stations) et **G** (1 station) décrits dans la section précédente pour la caractérisation de la sismicité régionale.

Sur ces 14 stations, l'OVSM-IPGP opère 4 stations sismologiques large-bande (**ZAM, LPM, TRM et MVM**) localisées au sud de la Martinique et 10 stations localisées au niveau de la Montagne Pelée. Les stations sont généralement installées dans des endroits isolés afin de ne pas être polluées par les vibrations générées par l'activité humaine.

Initialement, ce réseau était composé de sismomètres courte-période mono-composante permettant de détecter les mouvements du sol générés par des ruptures tectoniques de petites dimensions. Ces sismomètres courte-période enregistrant les ondes de volumes au-delà de 1 Hz permettent de détecter des séismes proches et sont traditionnellement déployés pour la surveillance d'un volcan actif. L'évolution de la technologie se faisant, la précision des récents sismomètres large-bande 3 composantes permet de détecter ces mêmes mouvements.

De ce fait, l'OVSM-IPGP a entrepris depuis 2020 la modernisation de son réseau sismologique local. En 2020, le réseau permanent de la Montagne Pelée était composé de 4 stations large-bande et de 5 stations courte-période. En 2021, le réseau permanent a été modernisé (8 stations numériques large-bande à 3 composantes : **MPLM, PBO, LAM, GBM, MLM, CPM, BAM, IA2** ; 1 station analogique courte-période : **PCM**). En 2022, une nouvelle station numérique large-bande à 3 composantes est venue compléter le réseau (**SCH2**).

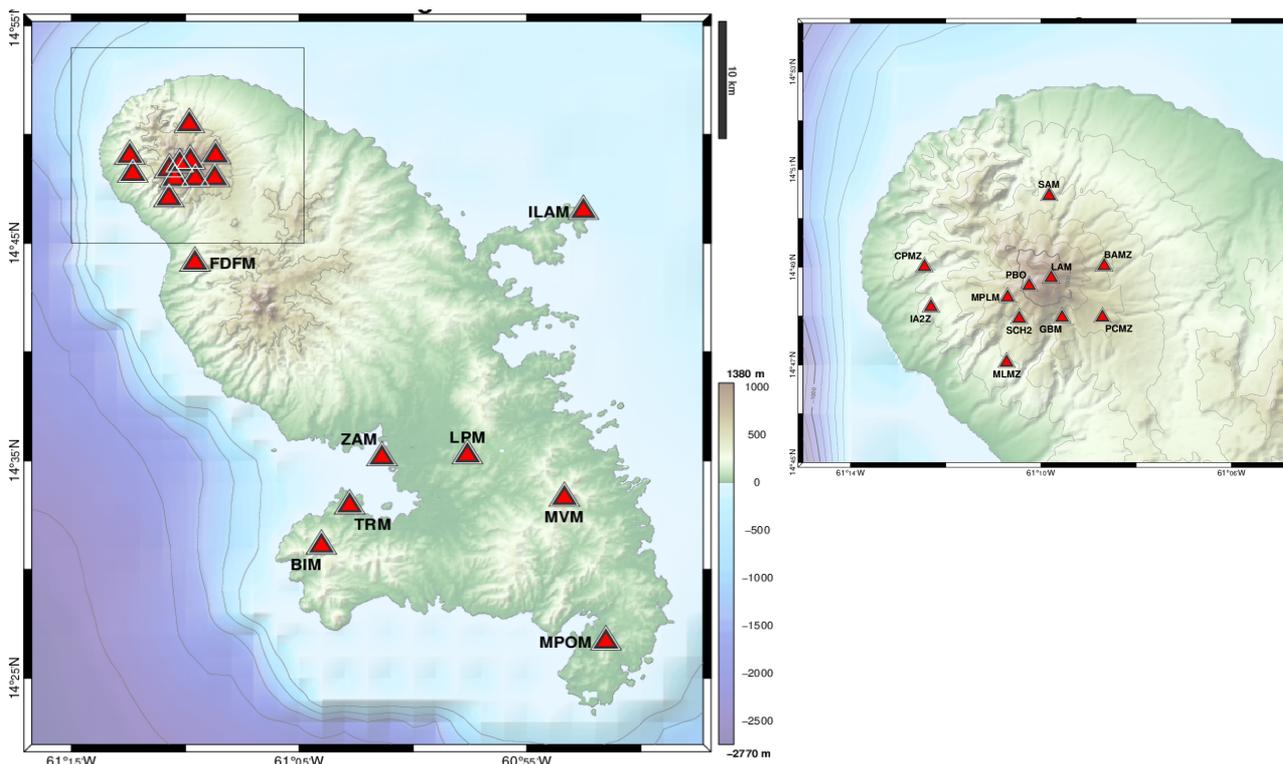


Figure 34. Réseau sismologique permanent de la Martinique (à gauche) et zoom sur la Montagne Pelée (à droite).



Les réseaux accélérométriques de Martinique

L'OVSM-IPGP utilise également pour la caractérisation de la sismicité locale les données des réseaux de stations accélérométriques qui mesurent l'accélération du sol générée par des tremblements de terre forts et proches. En général, on installe les accéléromètres là où le risque sismique est fort et où les enjeux sont importants (conséquences sur les activités humaines et les populations). Ils permettent d'obtenir l'amplitude de la vibration du sol sans saturer par rapport aux sismomètres qui restent très sensibles pour les séismes forts et proches. Ces mesures servent principalement aux ingénieurs du génie civil afin de connaître les mouvements du sol contre lesquels se prémunir, et aux sismologues afin d'étudier les mécanismes de la rupture sismique le long des grands accidents géologiques. Ils participent également à la génération de cartes d'intensité (grandeur liée aux dégâts matériels potentiels) après un séisme fort.

En Martinique, les réseaux accélérométriques comprennent 19 stations dont la majorité appartient à des collaborateurs (**Figure 35**). L'OVSM-IPGP possède 4 accéléromètres au niveau des stations large-bande du réseau **WI** (SAM, ILAM, BIM, MPOM). Le Réseau Accélérométrique Permanent (**RAP**) met à disposition 8 stations (MADI, MALA, MAMA, MAME, MASM, MASP, MATR, MAZM) et la Collectivité Territoriale de Martinique 7 stations (CGCA, CGLR, CGCP, CGBP, CGPL, CGMH, CGMB).

L'OVSM participe à la maintenance de l'ensemble de ces stations dont les 2 stations du barrage de la Manzo (station 'Haut' CGMH et station 'bas' CGMB).

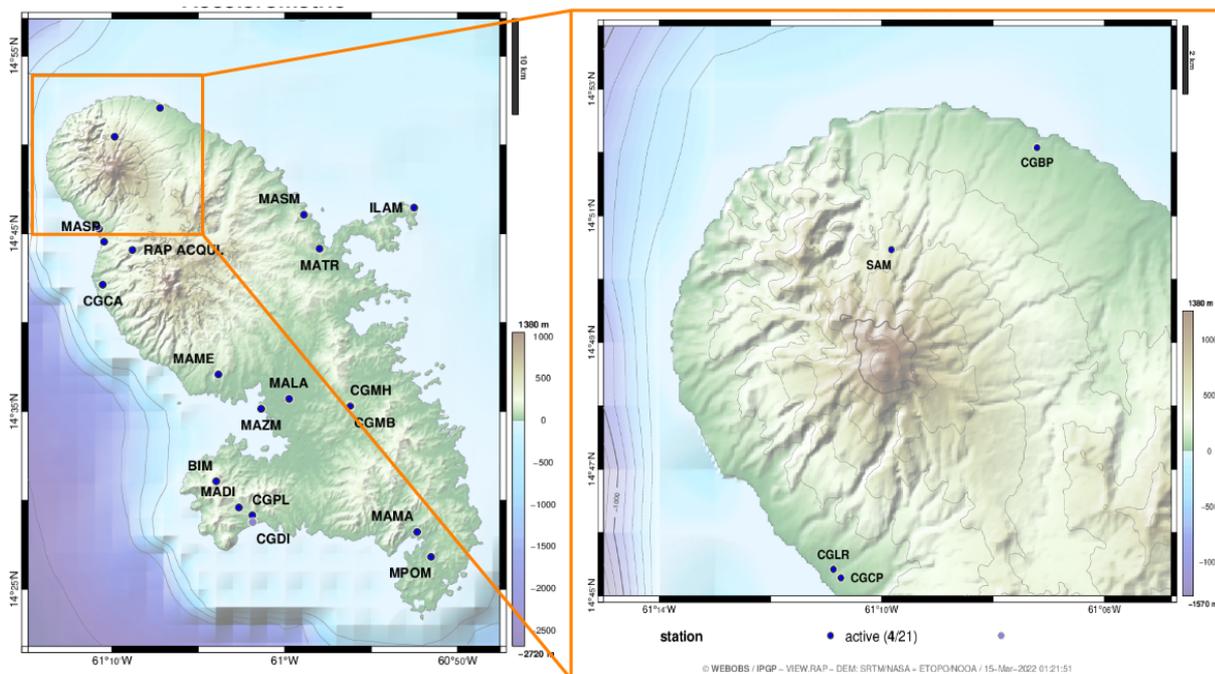


Figure 35. Réseaux accélérométriques de la Martinique (à gauche) et zoom sur la Montagne Pelée (à droite).

Le réseau de suivi des déformations

Les mesures de déformations aident à estimer les déplacements liés à la tectonique locale et régionale autour des failles actives ou à l'échelle de la plaque tectonique elle-même, ainsi qu'à l'étude du couplage de la zone de subduction (interactions entre les plaques tectoniques Caraïbe et Nord-Américaine). Au niveau de la Montagne Pelée, ces mesures servent à l'analyse des déformations de l'édifice volcanique ainsi qu'au suivi de la stabilité à long terme du flanc ouest du volcan sujet à des glissements de flanc par le passé.



Rapport annuel 2022

Observatoire volcanologique et sismologique de Martinique - IPGP

A l'OVSM-IPGP, les déformations sont mesurées grâce à un réseau GNSS (*Global Navigation Satellite System*) permanent (**Figure 36**), un réseau GNSS de répétition (**Figure 37**), ainsi que des inclinomètres de forage. L'ensemble des données enregistrées par le réseau GNSS permanent de l'OVSM-IPGP est traité quotidiennement, par session de 24h/30s, avec le logiciel scientifique GipsyX.

Réseau GNSS

En 2022, l'OVSM-IPGP a poursuivi le renforcement du réseau GNSS permanent avec l'installation de la station SCH2 (sismologique et GNSS continu), localisée dans les zones d'instabilité du flanc sud-ouest de la Pelée.

En 2023, il est prévu de déployer la station MMA0 sur le Morne Macouba au nord des dômes pour renforcer la surveillance de la partie sommitale de la Montagne Pelée. La station PBO0 (Petit Bonhomme) doit également devenir une station continue. Ces opérations nécessitent le soutien de la base hélicoptère de la Sécurité Civile et un temps clément pour pouvoir être réalisées. Pour les stations plus distales, il est aussi prévu de transformer le point de mesure LRIZ en station continue (GNSS et sismologique).

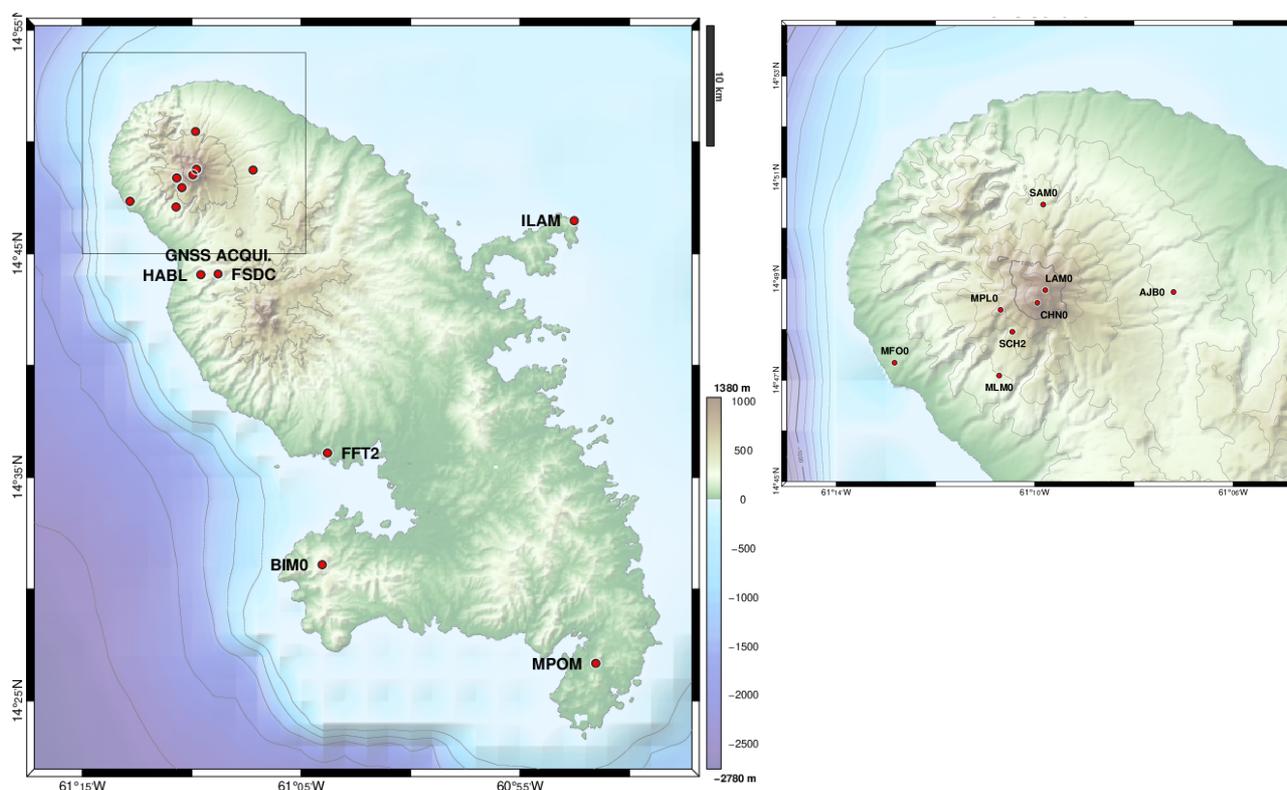


Figure 36. Réseau GNSS continu de la Martinique (à gauche) et zoom sur les 8 stations de la Montagne Pelée (à droite).



Rapport annuel 2022

Observatoire volcanologique et sismologique de Martinique - IPGP

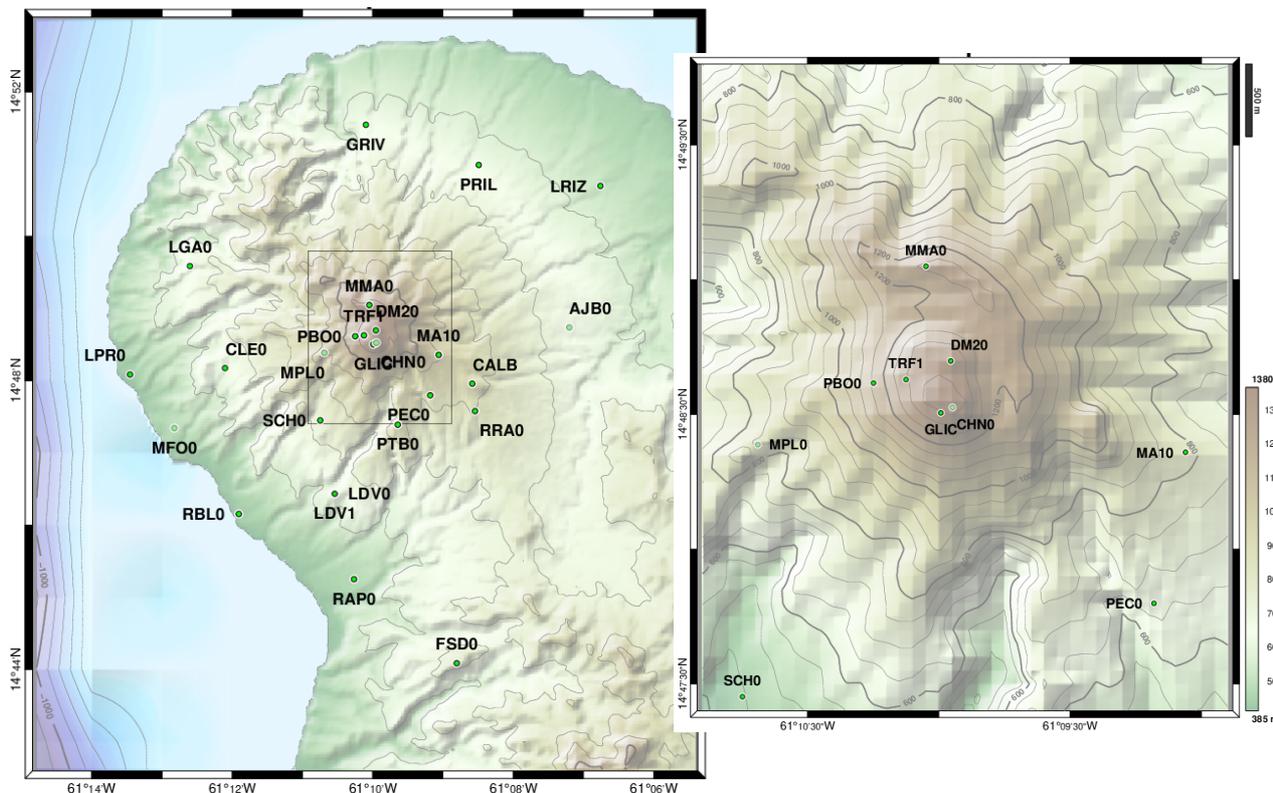


Figure 37. Réseau GNSS de répétition mesuré annuellement au niveau de la Montagne Pelée (source WebObs/OVSM).

Inclinométrie

Historiquement le réseau comprenait 4 stations de type Blum (PLU : Morne Plumé, CAL : Morne Calebasse, MAC : Morne Macouba et LAM : Morne Lacroix). Développées par l'IPGP elles ont été progressivement démontées entre 2008 et 2011 car la fragilité des inclinomètres Blum face aux séismes créaient des défaillances.

En 2008, l'IPGP monte un projet dans le but d'établir les conditions optimales et minimales (qualité des données, choix de l'instrumentation, de l'implémentation...) pour de nouvelles stations inclinométriques pour la surveillance d'un volcan d'arc dans le cadre de la détection d'une reprise d'activité volcanique et de l'étude des phases de volcanisme actif. La Montagne Pelée en Martinique a été sélectionnée pour ce projet.

En 2010, 3 inclinomètres ont été installés dans un forage à Ajoupa Bouillon (**IABJ0**) à des profondeurs différentes - 5m, 30m, 60m - afin de mener une étude comparative avec les mesures GPS. Leur technologie est analogue à un niveau à bulle contenant un liquide conducteur les rendant sensibles à l'inclinaison et à l'accélération du sol : pour les signaux lents (période > ~10 s) l'inclinaison est prépondérante tandis que pour les signaux rapides (période > ~10 s) l'accélération est prépondérante.

Depuis 2020, suite à l'installation d'une liaison 4G, la station transmet en direct ses données à l'observatoire et est maintenue par l'OVSM-IPGP.



Le système de détection automatique des lahars de la rivière du Prêcheur

La rivière du Prêcheur est équipée d'un système de détection automatique des coulées de boues ou lahars (terme d'origine indonésienne), constitué d'un module principal qui comprend trois géophones (RPRE, CPMA, CCPA) et d'un système secondaire de détection des coulées les plus fortes à base de cinq capteurs pendulaires (RPRE) (Figures 38 et 39). L'ensemble de ces données étant traité par une centrale d'acquisition à la Bibliothèque du Prêcheur (BIBLIO).

Ces capteurs ont été installés par l'OVSM à la fin de l'année 1999, suite aux coulées de boues de janvier 1997 et 1998, en s'inspirant de systèmes existants dans d'autres observatoires volcanologiques comme celui opéré par l'USGS sur les volcans des Cascades aux États-Unis.

Ce phénomène est provoqué par une grande quantité d'eau qui remobilise des dépôts présents au pied de la falaise Samperre issus majoritairement des glissements au niveau du Piton Marcel, en tête de la Rivière Samperre. Ces glissements se produisent de manière récurrente depuis plusieurs dizaines d'années.

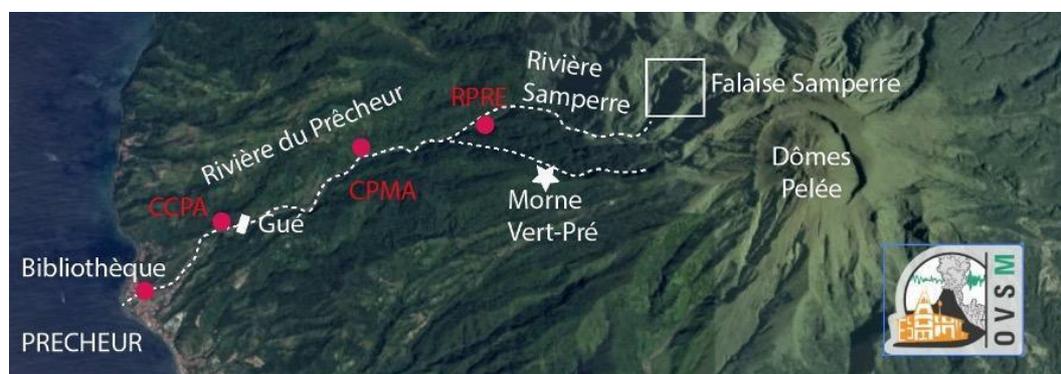


Figure 38. Localisation de la rivière du Prêcheur, de la rivière Samperre et de la falaise Samperre. Les géophones du système principal de détection automatique des lahars de l'OVSM IPGP sont représentés par des points rouges et le site d'observation visuelle et par caméra de Morne Vert-Pré par l'étoile blanche.

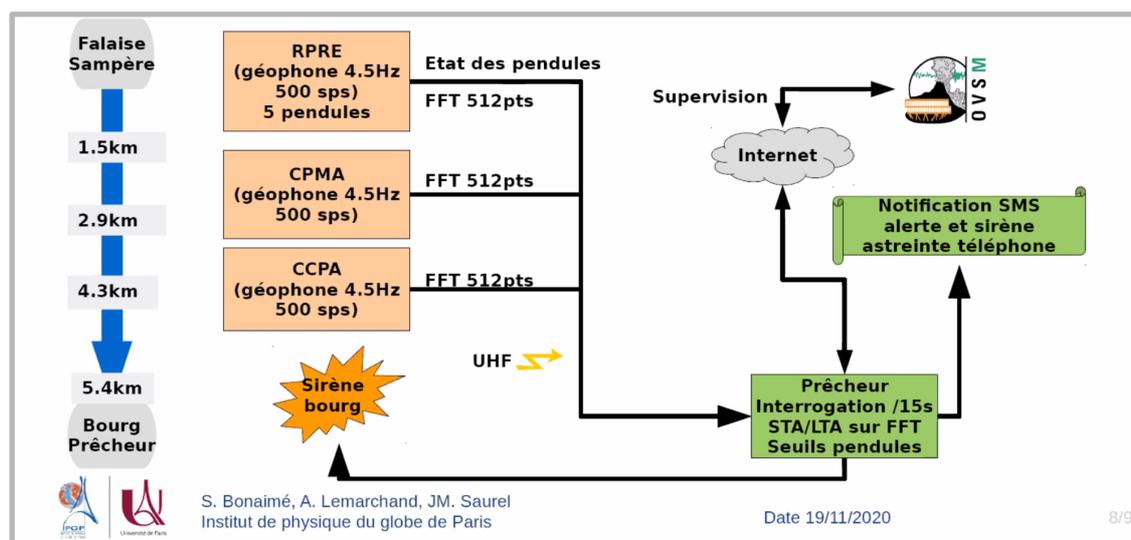


Figure 39. Système de détection automatique des lahars de la rivière du Prêcheur maintenu par l'OVSM IPGP.



Rapport annuel 2022

Observatoire volcanologique et sismologique de Martinique - IPGP

Le réseau de suivi géochimique de la Montagne Pelée

La géochimie couvre l'étude de la composition chimique des roches et minéraux ainsi que des eaux et gaz circulant dans la croûte terrestre. L'analyse des paramètres physico-chimiques notamment de sources thermales permet via la détection de changements d'étudier l'activité volcanique.

Depuis 1970, date de l'extinction de la dernière fumerolle en activité, l'observatoire suit les paramètres physico-chimiques et la température des Sources Chaudes (**SC**) de la rivière Chaude (coulée de la rivière Blanche) et du site nommé Puits Chaud (**FPC**) (**Figure 40**). En 1979, le laboratoire d'analyse des eaux à l'OVSG devient opérationnel et rend possible l'analyse systématique de paramètres additionnels tels que les concentrations en ions (anions, cations).

Le forage du site **FPC** était à l'origine utilisé par un agriculteur pour l'eau de son bétail. Dès 1965, il a été instrumenté, et entre 1996-1997 un forage à 10,5 m a été creusé et instrumenté pour des mesures continues de la température, du pH, de la conductivité et de la hauteur d'eau. La nouvelle station continue désignée par le site **FPC** transmet en temps réel ses données à l'observatoire et comprend les modules et les capteurs suivants :

- Alimentation : Batterie, panneau solaire et régulateur
- Acquisition et Transmission : Campbell CR1000 et Satel
- 4 Capteurs de bas en haut :
 - Sonde de température PT1000
 - Sonde de conductivité-température Campbell CS547 (bas)
 - Capteur de la hauteur d'eau (transducteur de pression Campbell PDCR1830)
 - Une sonde de conductivité-température Campbell CS547 (haut)

Des prélèvements manuels mensuels ont lieu sur les sites de la rivière du Prêcheur (**RP**), du forage Puits Chaud (**FPC**) et du forage de carrière **FCR1**. Le forage **FCR2** est quant à lui échantillonné bi-mensuellement. Le site des Sources Chaudes de la rivière Chaude (**SC**), plus difficile d'accès, était en moyenne échantillonné 1 à 2 fois par an. Depuis le passage au niveau d'alerte Jaune (Vigilance) de la Montagne Pelée, la fréquence d'échantillonnage a été augmentée à environ 4 à 6 par an. Les échantillons sont expédiés à l'OVSG-IPGP où une équipe de géochimie effectue les analyses en ions majeurs. Les analyses en concentration et en rapport isotopique du carbone inorganique dissous sont effectuées à Paris au Laboratoire de Géochimie des Isotopes Stables de l'IPGP.

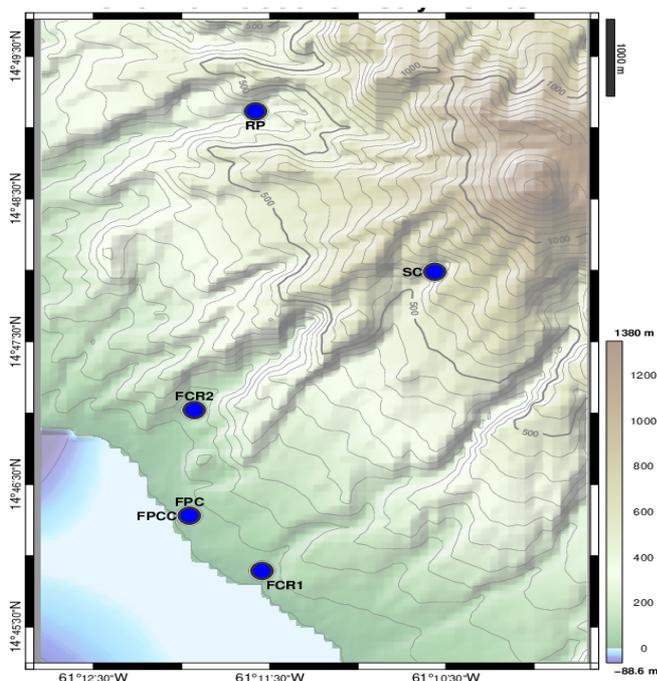


Figure 40. Localisation des points de prélèvements géochimiques réguliers effectués par l'OVSM-IPGP autour de la Montagne Pelée : Sources Chaudes (SC), Puits Chaud (FPC), le point de prélèvement de la rivière du Prêcheur (RP) et les deux nouveaux points de prélèvements au niveau de forages de carrières (FCR1 et FCR2).



Interventions sur les réseaux en 2022

L'équipe technique de l'OVSM réalise en moyenne une **centaine d'interventions** chaque année sur l'ensemble des réseaux de surveillance afin d'en assurer leur maintien opérationnel, leur jouvence et leur développement.

En 2022, l'équipe technique de l'OVSM a poursuivi ses efforts pour le maintien et la densification du réseau de stations sismologiques au niveau de la Montagne Pelée. Pour rappel, une station avait été modernisée en 2020 (GBM) et 4 autres l'avaient été en 2021 (CPM, BAM, MLM et IA2). Le réseau s'est renforcé en 2022 avec l'installation d'une station sismologique et de mesure de la déformation du sol (SCH2) sur le flanc sud-ouest de la montagne Pelée (ancienne zone de déstabilisation lors de l'éruption de 1902).

En plus des opérations de densification des réseaux, d'autres interventions d'entretien et de maintenance, sur l'ensemble des stations ont été réalisées pour garantir la continuité de l'acquisition et de la transmission des données vers l'observatoire. De plus, 9 interventions de contrôles préventifs et 2 interventions exceptionnelles ont été effectuées sur la station H05S du CEA située à Sainte-Anne (interventions régies par la convention liant le CEA et l'OVSM IPGP).

Interventions sur le réseau sismologique régional

En 2022, 3 stations du réseau régional **WI** et la station du réseau Géoscope **G** ont nécessité des interventions liées à l'énergie sur site, au diagnostic et au paramétrage des équipements, à la récupération de données ainsi qu'à des opérations d'entretien. Pour rappel, la station **MPOM** située sur la commune de Sainte-Anne a été vandalisée en septembre 2021, et n'a pas pu être réinstallée en 2022 (litige foncier indépendant de l'OVSM). Concernant le HUB de réception des données, des dégradations liées à la présence de rongeurs sur le site de l'ancien observatoire sont toujours présentes. L'objectif pour le début d'année 2023 est de transférer l'antenne de réception des données satellitaires, son radôme et la baie d'acquisition sur le site du nouvel observatoire.

❖ Station **BIM**

Mai 2022 : dysfonctionnement de l'une des voies du sismomètre, investigations sur l'instrumentation. Récupération manuelle des données Gps. *Juin 2022* : Remplacement du numériseur sismique.

❖ Station **ILAM**

Février 2022 : changement de la configuration des switchs des régulateurs et contrôleurs de tension. Configuration option Cygnus (SOH). Récupération manuelle des données Gps (30s et 1s).

❖ Station **SAM**

Janvier 2022 : changement de la configuration des switchs des régulateurs et contrôleurs de tension. Contrôle des tensions aux panneaux solaires. Récupération manuelle des données Gps. *Mars 2022* : Débroussaillage du site à cause de la végétation dense. Remplacement du numériseur de l'accéléromètre pour un problème de puissance non conforme, nettoyage des panneaux solaires. *Août 2022* : 1/2 régulateur et contrôleur de tension est non opérationnel, le *câble du numériseur de l'accéléromètre est défectueux* à remplacer. Entretien du site et nettoyage des panneaux solaires. Récupération manuelle des données Gps.

❖ Station **DFDM**

Mai 2022 : une mauvaise qualité de contact entre un connecteur et son interface a engendré une mauvaise qualité de signal qui a été résolu par un simple nettoyage des éléments. *Décembre 2022* : problème d'accès à la station depuis l'extérieur en fin de mois de novembre.



Rapport annuel 2022

Observatoire volcanologique et sismologique de Martinique - IPGP

Interventions sur le réseau sismologique de Martinique

Le maintien opérationnel du réseau **MQ** a été rendu possible grâce à des interventions régulières réalisées sur l'ensemble du réseau au cours de l'année, et qui sont synthétisées ici :

❖ Station **CPM**

Octobre 2022 : entretien du site et réglage de la transmission (mise à jour du firmware de l'équipement de communication Rippex et de la bande passante optimisée). *Décembre 2022* : réalisation d'un élagage général avec une entreprise spécialisée. *Remise à niveau du capteur et centrage des masses suite à une mauvaise qualité du signal sismique observée depuis l'observatoire.*

❖ Station **MVM**

Mars 2022 : dysfonctionnement d'équipements informatiques, et problème de charge de la batterie. Mise à jour des équipements. *Juin 2022* : 1/3 composante est défectueuse, le remplacement du câble et du capteur sont à prévoir.

❖ Station **PBO**

Juillet 2021 : remplacement du numériseur et de sa carte mémoire.

❖ Station **BAM**

Avril 2022 : optimisation de la réception de la station à l'observatoire (passage câble).

❖ Station **MPLM**

Juin 2022 : mission hélicoptérée avec le concours du D972 pour le remplacement des batteries solaires et l'optimisation du coffret d'acquisition (en jumelage avec l'intervention à GBM).

❖ Station **TRM**

Juin 2022 : la pousse d'arbres dans le cône de visée perturbe sur la transmission et gêne la qualité de réception des données à l'observatoire. Optimisation à faire.

❖ Station **GBM**

Juin 2022 : opération de maintenance avec le concours du D972 (en jumelage avec l'intervention à MPLM).

Interventions sur les réseaux accélérométriques de Martinique

En 2022, 3 stations du réseau accélérométrique de la Martinique sont opérationnelles sur les 19 stations installées. La numérisation de certaines stations sera faite dans les prochains mois.

❖ Station **CGBP**

Janvier 2022 : le maintien opérationnel des équipements devient compliqué avec le numériseur Képhren qui semble obsolète et qui rencontre des problèmes d'alimentation, d'écriture sur le disque dur, etc. La station est actuellement hors service et nécessite le remplacement de certains équipements. *Novembre 2022* : investigations pour tenter de récupérer le numériseur.



Rapport annuel 2022

Observatoire volcanologique et sismologique de Martinique - IPGP

Interventions sur le réseau de suivi des déformations

En 2022, des interventions ont été réalisées sur les stations du réseau de suivi des déformations (réseau GNSS permanent et inclinomètre) :

❖ Station **AJB0**

Janvier 2022 : réinstallation de la station après un défaut d'antenne Gps. *Avril 2022* : réalisation d'une documentation avec des schémas électriques. *Mai 2022* : il faut revoir l'espace sur le serveur dédié pour libérer de l'espace et récupérer les données en direct.

❖ Station **SCH2**

Mai 2022 : prospection pour l'implantation d'une nouvelle station de mesure, et réalisation de survols en drone. Mission réalisée avec le concours du D972. *Octobre 2022* : mission hélicoptérée pour l'**installation de la station** sismologique et de mesures de déformation du sol.

❖ Station **MFO0**

Mai 2022 : élagage partiel du site pour une amélioration de la qualité des données. *Décembre 2022* : réalisation d'un élagage général avec une entreprise spécialisée.

Interventions sur le système de détection automatique des lahars de la rivière du Prêcheur

❖ Station **RPRE**

Février 2022 : mission hélicoptérée avec le concours du D972 pour le rétablissement de l'alimentation et la reprogrammation de la Campbell. *Août 2022* : Gestion à distance du fichier de calibration, l'archivage de la version en cours d'utilisation et de ses spécifications et de la prochaine version.

❖ Station **CPMA**

Février 2022 : défaut constaté sur la station ; investigation sur le capteur et/ou l'électronique. *Avril 2022* : réalisation de la documentation électronique et code, remplacement de l'électronique et de l'AFM pour un retour opérationnel de la station. *Mai 2022* : mauvaise connexion sur les équipements de réception à l'observatoire, des perturbations électromagnétiques sont observées sur la transmission. *Juillet 2022* : déplacement de l'antenne AFM à cause des perturbations des données (FFT). *Août 2022* : changement du fichier de calibration et déploiement de la dernière version développée.

❖ Station **CCPA**

Avril 2022 : remplacement de l'électronique et de l'AFM. *Mai 2022* : maintenance préventive et remplacement de la batterie solaire ; réalisation de la documentation électronique et du code. *Août 2022* : changement du fichier de calibration et déploiement de la dernière version développée.

❖ Station **BIBLIO**

Février 2022 : intervention au niveau du système pendulaire RPRE pour des tests de redémarrage pour investigation et validation, test également du redémarrage à distance. Réactivation de la sirène par l'intermédiaire du disjoncteur à l'intérieur du coffret. *Avril 2022* : désactivation de la sirène pendant 4 heures et demi de temps pour la réalisation d'une intervention sur la station de CPMA, reboot du logiciel à la bibliothèque pour investigation et perte des calculs alarme et sirène CCPA, reboot du système informatique à la bibliothèque (HW et modem internet) suite à une perte de transmission entre la bibliothèque et l'observatoire. *Juillet 2022* : les données ne sont plus disponibles à cause du retrait du routeur et de changement de configuration d'adressage ; diagnostic sur les déclenchements intempestifs de la sirène, bilan avec un état des lieux sur site après le déclenchement de la sirène du 21 juillet 2022. *Août 2022* : changement de l'adressage IP et du fichier de calibration, test et déploiement d'une nouvelle mise à jour du firmware, archivage de la documentation sur les éléments du système. *Octobre 2022* : passage en adresse IP fixe.



Rapport annuel 2022

Observatoire volcanologique et sismologique de Martinique - IPGP

Site d'observation de la falaise Samperre au Prêcheur

❖ Station du Morne Vert Pré **MVPM**

Décembre 2022 : l'OVSM a lancé les travaux d'infrastructure béton légère avec le concours de CAN Caraïbes, permettant à court terme l'installation d'une station d'acquisition d'images et de vidéos de hautes qualités permettant un suivi complémentaire des lahars qui peuvent prendre naissance au pied de la falaise Samperre ou le long de la rivière du Prêcheur.

Stations Météorologiques

L'OVSM-IPGP possède une station météorologique au niveau du deuxième refuge de la Montagne Pelée (**LAM**) et d'un pluviomètre dans la commune du Prêcheur (**CPM**). En mars 2022, une intervention a été réalisée sur la station LAM pour optimiser les paramètres d'acquisition de la station (taux d'échantillonnage, etc.).

Interventions sur le réseau de suivi géochimique de la Montagne Pelée

❖ Station Puits Chaud Continu **FPCC**

Mai 2022 : récupération manuelle des données jusqu'à la mise en place d'une transmission stable (récupération du matériel de transmission à l'ancien observatoire, réalignement de la fréquence). *Décembre 2022* : réalisation d'un élagage général avec une entreprise spécialisée.

❖ Station Sources Chaudes **SCH**

Un suivi trimestriel des paramètres géochimiques est opéré avec le concours du D972 avec l'hélicoptère du personnel de l'OVSM sur zone pour une bonne matinée de mesures sur place (4h). En 2022 nous avons effectué 4 interventions sur le site des Sources Chaudes en février, mai, août et décembre.

Autres Interventions

L'OVSM effectue aussi des interventions particulières en réponse à des événements survenus au cours de l'année pour accroître la surveillance de certains sites (stations temporaires, antennes sismiques...).

❖ Station sismique large bande Temporaire **CROM**

Décembre 2022 : désinstallation de la station.

❖ Station sismique large bande Temporaire **AJB0**

Octobre 2022 : contrôle de la station, récupération des données et réalisation d'un entretien du site. La station est toujours en fonctionnement.

❖ Station sismique large bande Temporaire **LGA0**

Mars 2022 : désinstallation de la station.

Evolution du système informatique en 2022

Une vingtaine de machines virtuelles (VM) fonctionnent dans un cluster haute disponibilité installé à l'observatoire et qui permet de faire fonctionner tous les services informatiques de l'observatoire en totale autonomie (récupération, traitement et sauvegarde des données).

La modernisation du cluster informatique, initialement installé en 2012 dans l'ancien bâtiment de l'observatoire, a débuté en mars 2019 lors du déménagement dans l'enceinte du nouveau bâtiment. L'OVSM a pour cela acquis 4 nouvelles baies 42U qui comprennent un système de refroidissement optimal. La salle initialement prévue pour accueillir le cluster étant affectée par



Rapport annuel 2022

Observatoire volcanologique et sismologique de Martinique - IPGP

d'importantes infiltrations d'eau, la CTM a aménagé en **2021** une nouvelle salle pour héberger de façon sécurisée ces nouvelles baies et leurs serveurs informatiques.

Le nouveau cluster est donc composé de :

- 3 serveurs : HPE DL360 Gen10 avec 2 Xeon 10 coeurs, 128Go de RAM, une double alimentation, 6 ports Gb, 4 ports 10Gb SFP+ et carte de gestion à distance ;
- 1 espace de stockage "SAN iSCSI" : une baie de disques MSA2050 avec double contrôleur et alimentation, deux switchs iSCSI avec 48 ports 10Gb et 2 ports 40Gb.

La gestion du cluster a été affranchie de licences onéreuses par le remplacement de l'hyperviseur VMware par Proxmox, et l'observatoire est équipé d'un NAS Netgear ReadyNas avec 8 disques SATA 7.2k 8To pour archiver les données et sauvegarder les VMs.

En **2022**, l'installation de ce nouveau cluster informatique modernisé a été finalisée et il est aujourd'hui pleinement fonctionnel.

Archivage et distribution des données

Les principaux volumes de données produits et distribués par l'observatoire volcanologique et sismologique de Martinique concernent les réseaux de sismologie et de géodésie. Les données sismologiques sont distribuées dans les formats et via les interfaces standards adoptés par la communauté internationale (fédération des réseaux sismologiques numériques, FDSN). En 2022, l'observatoire a acquis un total d'environ **350 Go** de nouvelles données sismologiques. A ces données brutes, il faut rajouter un produit sismologique : le catalogue sismique validé en temps-réel, dont le BCSF-ReNaSS affiche le contenu sur leur site grand public. Les données de géodésie sont archivées et distribuées dans les standards de la communauté géodésique. En 2022, avec l'augmentation du nombre de stations GNSS permanentes, l'OVSM a acquis plus de **4 Go** de données GNSS. Ces données brutes sont distribuées via le portail Volobsis hébergé et opéré par le centre de données de l'IPGP.

En 2022, les observatoires volcanologiques ont déployé la version de production de la nouvelle infrastructure GLASS de distribution des données GNSS développée par le groupe GNSS dans le cadre d'EPOS. Grâce à ce nouveau portail de distribution, les données GNSS de l'OVSM et des observatoires volcanologiques de l'IPGP sont pleinement intégrées au portail européen de données EPOS. De même, le webservice distribuant les catalogues de sismicité a été déclaré et intégré au portail EPOS qui ouvrira officiellement au printemps 2023.

Les localisations des séismes de l'arc des Antilles sont validées quotidiennement par les deux observatoires de Martinique et Guadeloupe. Afin de produire un catalogue homogénéisé à l'échelle de l'arc, un travail de fusion des deux catalogues et de validation a été mené en 2022. Il a abouti à la publication d'une version figée et millésimée pour les années 2014 à 2019 incluses. Ce catalogue validé est distribué via le nouvel entrepôt de données hébergé et géré par le centre de données de l'IPGP.



Rapport annuel 2022

Observatoire volcanologique et sismologique de Martinique - IPGP

Activités diverses de l'OVSM

Formations, missionnaires et stagiaires

Formations

Le personnel de l'OVSM IPGP a pu suivre différentes formations au cours de l'année 2022 :

- **du 28 mars au 01 avril 2022** : intégration à la CTM (V. MININ)
- **07 avril 2022** : Web-conférence réseau de drones et capteurs RTK Centipède
- **mars 2022** : Exercice d'évacuation en cas d'incendie
- **du 27 au 28 juin 2022** : Mise à niveau GIM (Groupe d'Intervention Macrosismique)
- **du 04 au 14 novembre 2022** : participation à la Biennale du Réseau Accélérométrique Permanent (C. VIDAL)

Missionnaires

L'OVSM a par ailleurs accueilli des chercheurs ou des ingénieurs de l'extérieur ou de l'IPGP lors de leurs missions à l'observatoire :

- **du 15 janvier au 31 janvier 2022** : Maryline Specht (Sorbonne Universités)
- **du 26 janvier au 01 février 2022** : Valérie Clouard et Sirel Colon (GET - Observatoire Midi-Pyrénées - Toulouse)
- **du 12 mars au 26 mars 2022** : Guillaume Carazzo et Audrey Michaud-Dubuy (IPGP)
- **du 24 mars au 26 mars 2022** : Sirel Colon (GET) et Franck Audemard (Vénézuëla)
- **du 24 avril au 13 mai 2022** : Jean-Bernard de Chabalière (IPGP)
- **du 20 mai au 28 mai 2022** : Pierre Sakic et Jean-Marie Saurel (IPGP)
- **du 4 juillet au 7 juillet 2022** : Philippe Kowalski (OVPF IPGP - La Réunion)
- **du 17 novembre au 24 novembre 2022** : Georges Boudon (IPGP)

Stagiaires

Lors de cette année, sept étudiants ont été accueillis en stage à l'observatoire tous cursus confondus :

- **du 21 mars au 10 juin 2022** : Aurélie Filliaert, master 1 IPGP
Encadrée par Jordane Corbeau, Claudio Satriano (IPGP) et Fabrice Fontaine
- **du 5 avril au 22 avril 2022** : Sonja Zhou Walgren, master 1 IPGP
Encadrée par Arnaud Burtin (IPGP), Fabrice Fontaine et Jordane Corbeau
- **du 12 avril au 17 avril 2022** : Michel Frangieh, master 2 IPGP
Encadré par Jean-Philippe Métaixian (IPGP), Fabrice Fontaine et Jordane Corbeau
- **du 7 juin au 10 juin puis du 20 juin au 1 juillet 2022** : Bryan Mélézan, stage de seconde
Encadré par Frédéric Jadelus et David Mélézan
- **du 26 juin au 30 juillet 2022** : Sarah Thuillier, 1^e année EOST - Strasbourg
Encadrée par Jordane Corbeau
- **du 4 au 30 juillet 2022** : Camille de Montaudry, licence 3 IPGP
Encadrée par Jordane Corbeau
- **du 18 juillet au 29 juillet 2022** : Axelle René, licence 3 Sorbonne Université
Encadrée par Fabrice Fontaine



Rapport annuel 2022

Observatoire volcanologique et sismologique de Martinique - IGP

Hygiène et sécurité

L'évolution de la crise sanitaire en Martinique et les mesures des autorités ont permis à l'observatoire de s'adapter pour une reprise de ces activités en conséquence avec l'accueil sur site de collaborateurs scientifiques et autres partenaires professionnels. La mise à niveau des équipements de sécurité a été faite de manière à permettre au personnel qui le souhaite de pouvoir maintenir les gestes barrières comme le prévoient les mesures sanitaires.

En avril 2022, l'observatoire a d'ailleurs mis en place une logistique pour la gestion et l'occupation des studios permettant d'accueillir les missionnaires, stagiaires et étudiants de passages au sein de l'établissement. Des achats ont été faits au cours de l'année pour l'aménagement intérieur de ces locaux.

La majorité du personnel de l'observatoire a contracté le virus du Covid 19 au cours de l'année 2022. Il n'y a pas eu de visite médicale cette année, et 3 accidents de travail ont été déclarés cette année. Par ailleurs, en avril 2022, des formulaires d'accident de travail ont été mis à disposition du personnel au niveau de la banque d'accueil afin de faciliter les démarches de prises en charge administratives.

Le remplacement de l'agent d'entretien du bâtiment de l'OVSM lors de ses congés annuels a pu se faire en collaboration avec les services de la CTM durant le mois d'août 2022.

La présence de nuisibles tels que des rongeurs au niveau des installations sur le terrain amène l'équipe technique à réaliser des opérations in situ avec la pose d'appâts et un entretien régulier de la végétation. Par ailleurs, 4 interventions de dératisation et de désinsectisation sont réalisées chaque année dans l'enceinte du bâtiment de l'OVSM.

Bâtiments

En 2022, nous avons procédé à la mise en sécurité du bâtiment avec la mise en place d'un contrat de télésurveillance et la mise en place d'un contrat de maintenance du portail d'accès à l'observatoire.

Depuis la mise à disposition du bâtiment (mars 2019), l'observatoire continue de faire face à des infiltrations d'eau dans des pièces stratégiques devant accueillir initialement les serveurs d'acquisition et d'autres équipements alimentés électriquement. Par conséquent, une intervention a eu lieu en octobre 2022 concernant les travaux d'étanchéité en façade du bâtiment avec les différents acteurs (COVERIS; CentreEtanch, MO et MOE ainsi que la CTM) suite à une visite sur site en août 2022 pour la réalisation des devis (CTM). Des travaux d'aménagement et de remodelage de talus en face des studios au RDJ, la tonte complète du site (LES BOUGAINVILLEES), ainsi que la réalisation de descentes d'eau pluviale ont été entrepris (CCTPM). En mai 2022, une entreprise a procédé durant 2 jours à l'entretien général de l'espace vert, et les services de la CTM ont réalisé le nettoyage au karcher du site.

N'étant plus fréquenté, des dégradations et vandalismes sont observés au niveau de l'ancien observatoire. Par conséquent un diagnostic des volets roulants a été fait en juillet 2022 pour maintenir les équipements restants en sécurité.

Electricité

Le maintien des installations électriques de l'observatoire reste une préoccupation première pour la sécurité du personnel et la continuité des services dépendant de cette alimentation. En avril 2022, nous avons procédé au remplacement de la batterie du groupe électrogène mobile dans l'ancien observatoire, et l'entreprise Alizélec a réalisé une intervention concernant le dysfonctionnement des lumières au niveau du deck au rez-de-jardin.

La récupération des onduleurs a été faite en juillet 2022, avec un remplacement en août (LSCS). Le groupe électrogène du nouvel observatoire dispose d'un contrat de maintenance préventive et des interventions ont été réalisées en avril, août et décembre 2022.



Rapport annuel 2022

Observatoire volcanologique et sismologique de Martinique - IPGP

Climatisation

Depuis plusieurs mois, l'observatoire ne dispose plus de climatisation au niveau du rez-de chaussé (étage des bureaux). Plusieurs diagnostics sur le système de climatisation ont été menés en mars et avril 2022, avec une réparation en juin qui a duré 2 à 3 semaines durant laquelle une opération d'entretien a été réalisée en juin 2022. En novembre 2022 les services de la CTM ont essayé d'apporter une solution en réalisant un diagnostic et un début de réparation, non concluante car le matériel présent sur ces installations n'est plus en production et par conséquent le matériel de remplacement introuvable. Il est donc nécessaire de procéder au remplacement de l'ensemble des équipements. Une dalle de béton a été réalisée sous le bâtiment en août 2022 en vue du déplacement des moteurs VRV pour une meilleure évacuation de la chaleur.

Véhicules

La gestion du parc de véhicules automobiles de l'observatoire est maintenue en réalisant les différentes interventions d'entretien mécanique. Un constat amiable a été dressé lors d'un petit accident causant le bris de vitre du hayon arrière du véhicule tout terrain en octobre 2022.

Relations avec les autorités

Participation à l'exercice "Pelée 22" de la Préfecture en novembre et décembre 2022

Sollicité par le SIDPC de la Préfecture, l'OVSM a participé activement à l'exercice **Pelée 22**, destiné à tester le nouveau plan ORSEC Volcan. Cet exercice proprement dit a eu lieu le 7 décembre 2022. L'objectif principal du SIDPC consistait à procéder à l'évacuation réelle de quartiers de deux communes (Morne Vert et Le Lorrain) vers des zones d'accueil au sud de la Martinique, toutes les communes et services étant encouragés à tester certains aspects de leurs actions. L'équipe de l'OVSM soutenue par l'IPGP a participé au comité de pilotage de l'exercice, principalement pour définir le scénario : l'équipe s'est attachée à insérer dans cet exercice des phénomènes volcaniques réalistes, pour que les acteurs intègrent les aléas et désordres que peuvent produire une éruption volcanique, même mineure.

Pour tenir compte d'une cinétique d'**évolution volcanique réaliste** (et non limitée à une journée d'exercice), l'OVSM et l'IPGP ont commencé en interne l'exercice dès le mois de novembre, avec une intensification progressive de l'activité volcanique et les passages progressifs des niveaux d'alerte jusqu'au niveau rouge le 7 décembre (en transmettant au SIDPC des rapports réguliers de l'évolution de l'activité). Un chronogramme très détaillé a été produit, avec en face toutes les actions (**Figure 41**).

L'OVSM et l'IPGP ont pu tester la mobilisation des scientifiques dans les différentes structures et comités institutionnels français, les agences nationales et internationales en charge de moyens spatiaux (imagerie optique, infra-rouge, radar, chimique...).

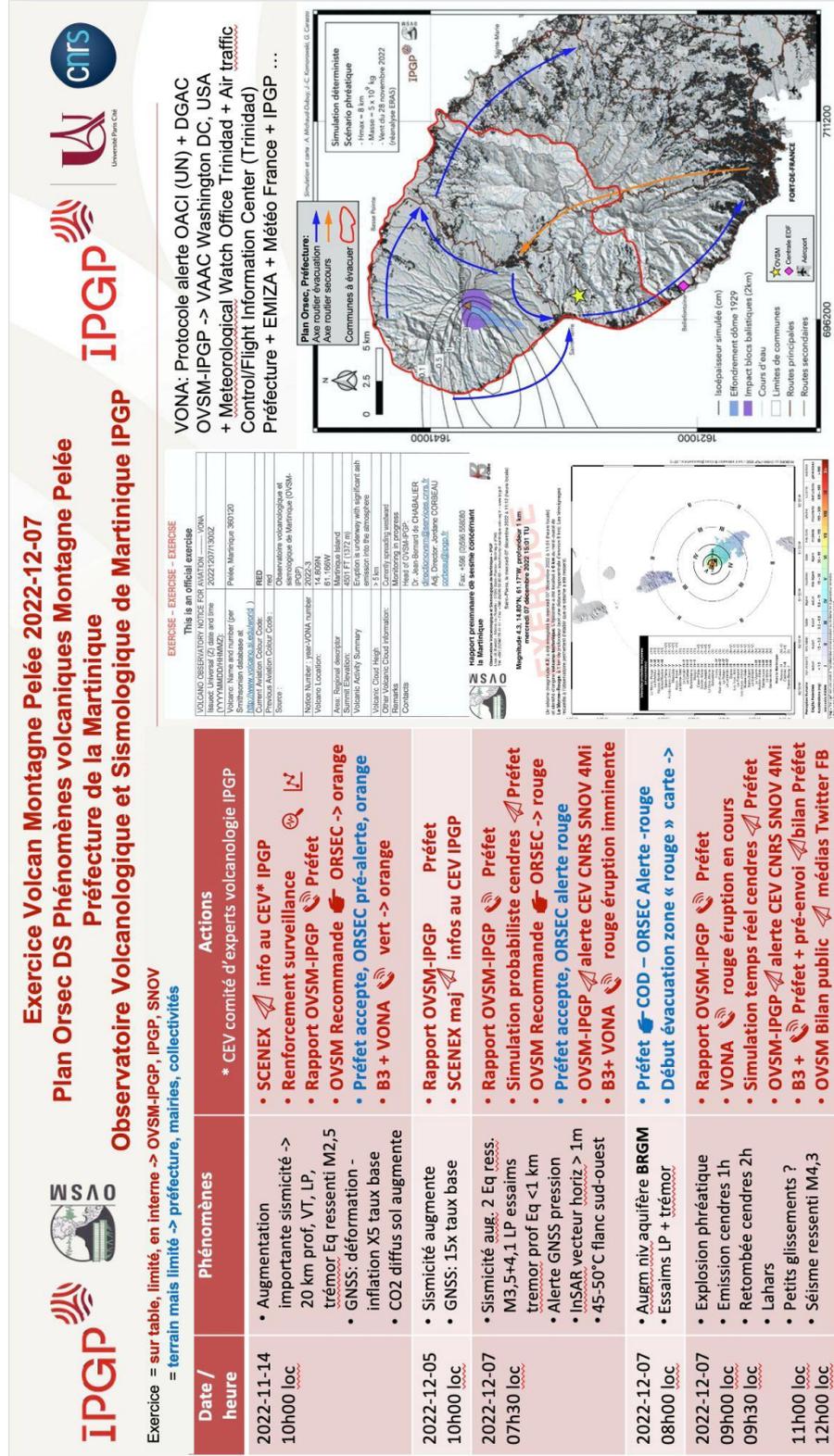
Pendant l'exercice du 7 novembre, ont été transmis : des VONA (avis de l'observatoire volcanologique pour l'aviation civile, une des missions essentielles des observatoires) (**Figure 42**), des cartes d'intensité sismiques liées à des séismes sous la Pelée, et des modélisations de scénarios de retombées de cendres d'une explosion phréatique de référence (**Figure 42**) lorsque l'activité a fortement augmenté ainsi qu'en temps quasi-réel juste après l'explosion phréatique intervenue pendant l'exercice. Ces modélisations ont été réalisées avec le code de simulation HAZMAP et les outils développés dans le projet Interreg PREST (voir partie Projets ci-après).



Rapport annuel 2022

Observatoire volcanologique et sismologique de Martinique - IPGP

Figure 41 : Chronogramme détaillé des actions menées par l'OVSM au cours de l'exercice Pelée 22.





Rapport annuel 2022

Observatoire volcanologique et sismologique de Martinique - IPGP

EXERCISE – EXERCISE – EXERCISE

This is an official exercise

VOLCANO OBSERVATORY NOTICE FOR AVIATION ——— VONA	
Issued: Universal (Z) date and time (YYYYMMDD/HHMMZ):	20221207/1300Z
Volcano: Name and number (per Smithsonian database at http://www.volcano.si.edu/world)	Pelée, Martinique 360120
Current Aviation Colour Code:	RED
Previous Aviation Colour Code :	red
Source :	Observatoire volcanologique et sismologique de Martinique (OVSM-IPGP)
Notice Number : year-VONA number	2022-3
Volcano Location:	14.809N 61.166W
Area: Regional descriptor	Martinique Island
Summit Elevation:	4501 FT (1372 m)
Volcanic Activity Summary	Eruption is underway with significant ash emission into the atmosphere
Volcanic Cloud Height	> 5 km
Other Volcanic Cloud information:	Currently spreading westward
Remarks	Monitoring in progress
Contacts	Head of OVSM-IPGP: Dr. Jean-Bernard de CHABALIER directionovsm@services.cnrs.fr Adj. Director: Jordane CORBEAU corbeau@ipgp.fr Fax: +596 (0)596 558080 Tel.: +596 (0)596 784141 Mobile: +596 (0)696 603485 Mobile: +596 (0)696 050471
Next notice:	A new VONA will be issued if conditions change significantly or the colour code changes http://www.ipgp.fr/fr/ovsm/actualites-communiques-publics-de-lovsm

EXERCISE – EXERCISE - EXERCISE

This is an official exercise

IPGP OVSM

EXERCISE EXERCISE EXERCISE

RAPPORT D'ACTIVITÉ de la Montagne Pelée (Martinique)
du mardi 07 décembre 2022 à 07h30 locale (11h30 TU) :

Simulation d'un scénario référence de dispersion de cendres en cas d'une éventuelle éruption explosive de la Montagne Pelée (Martinique)

Modélisation probabiliste des retombées de cendres pour le scénario 2 du Plan ORSEC dispositif spécifique phénomènes volcanique Montagne Pelée

Dans ce scénario l'éruption simulée éjecte 5 millions de tonnes à 8km d'altitude dont la dispersion spatiale est simulée avec le code HAZMAP (modélisation OVSM/IPGP) en utilisant plus de 40 ans (1979-2021) de profils journaliers de vents autour de la Pelée (40 x 365 modélisations). Les isolignes présentent les 5% de probabilité (seuil utilisé classiquement) d'atteindre 1 mm, 1 cm et 5 cm de cendres au sol sur la totalité de l'épisode éruptif. Il faut intégrer qu'1cm (10 mm) de cendres sèches réduit la vitesse nominale de déplacement de véhicules de 50 % environ.

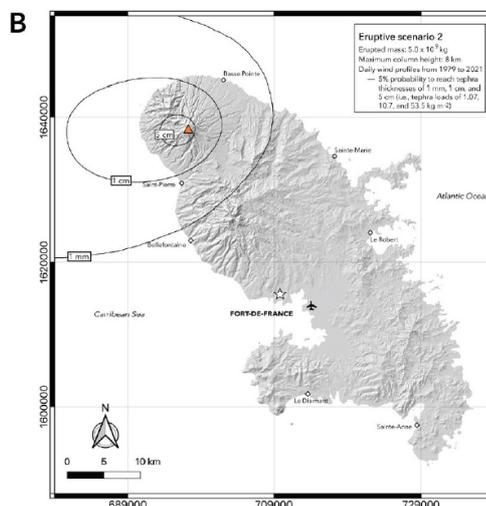


Figure 42 : Exemples de documents transmis par l'OVSM au cours de l'exercice Pelée 22 : VONA, avis de l'observatoire volcanologique pour l'aviation civile (à gauche) et modélisation de retombées de cendre pour un éruption phréatique (à droite).

Vulgarisations, Conférences et médias

Lors de l'année 2022, plusieurs manifestations et sollicitations ont amené l'équipe de l'OVSM à accueillir du public dans l'enceinte du bâtiment, à réaliser des actions de vulgarisation scientifique et des conférences à l'extérieur, ou encore à répondre à des demandes d'interviews :

- le **12 janvier 2022**, prises de vues de l'ancien observatoire dans le cadre de la candidature UNESCO ;
- le **10 février**, participation à un tournage pour le reportage Faut Pas Rêver ;
- **mars 2022**, participation au jury du **concours CGénial** Collège au CDST de Saint-Pierre ;
- **mars 2022**, participation à l'exercice **Caribe Wave** pour l'alerte aux tsunamis ;
- **juin 2022**, participation à un tournage avec l'équipe de The Explorers ;
- le **17 septembre 2022**, accueil du public à l'OVSM lors des **Journées du Patrimoine** ;
- le **4 octobre 2022**, Inauguration du Domaine Martiniquais d'Expérimentations de Grande Savane au Prêcher (Dômes de Grande Savane) ;
- le **14 octobre 2022**, accueil d'une délégation de 25 élus et personnels communaux du Lorrain ;
- le **20 octobre 2022**, visite de l'observatoire de membres de l'association Trait d'union ;
- le **20 octobre 2022**, visite de l'observatoire du sous-directeur de la DGSCGC et du cabinet du Préfet ;



Rapport annuel 2022

Observatoire volcanologique et sismologique de Martinique - IPGP

- le **25 octobre 2022**, présentation des aléas sismiques et volcaniques au Carbet, à l'occasion du séminaire « résilience » organisé par la CTM et l'AFPCNT ;
- du **21 au 24 novembre 2022**, participation à un tournage pour un reportage de RMC Découvertes
- le **24 novembre 2022**, visite de la mairie de Fond-Saint-Denis accompagnée par une délégation du Bénin experte en éco-agriculture (modèle de Songhaï) ;
- le **26 novembre 2022**, accueil du public à l'OVSM à l'occasion de la **Fête de la Science**. Présentation des activités de surveillance de l'OVSM et conférence sur les aléas telluriques aux Antilles. La DEAL a organisé un atelier sur la prévention du risque sismique ;
- les **28 et 29 novembre 2022**, accueil à l'OVSM d'un colloque international sur la modélisation des coulées pyroclastiques, organisé par l'Université de Tampa (Floride) et financé par la NSF (USA). Les 16 scientifiques présents et 19 en visioconférence ont utilisé l'amphithéâtre de l'OVSM et ses équipements qui se sont avérés adaptés à ce type de manifestation. Les participants ont été très satisfaits ;
- le **1^{er} décembre 2022**, conférence sur les aléas telluriques à la mairie du Vauclin à l'occasion de la **semaine Replik** ;
- le **2 décembre 2022**, accueil des établissements scolaires et du public à l'occasion de la **semaine Replik** ;
- le **13 décembre 2022**, conférence publique à l'Espace Régional du Raizet aux Abymes (Région Guadeloupe). Présentation des innovations technologiques développées par le projet Interreg PREST pour la surveillance sismique et volcanique, et l'observatoire sous-marin connecté des Saintes ;
- le **16 décembre 2022**, conférence publique à l'Hôtel de l'Assemblée (CTM) à Fort-de-France. Présentation des innovations technologiques développées par le projet Interreg PREST pour la surveillance sismique et volcanique, l'observatoire sous-marin connecté des Saintes, suivi d'un bilan sur l'activité de la Montagne Pelée, deux ans après le passage en vigilance jaune.



Conférences lors des Journées du patrimoine (à gauche) et de la Fête de la Science (à droite)



Accueil du colloque de l'Université de Tampa (Floride) et à droite de la DEAL à l'occasion de la Fête de la Science



Projets et collaborations

Projet PREST

WP1 : Colloque PREST

Les Rencontres Scientifiques OVSM-IPGP-PREST “Volcanisme, sismicité et tectonique des Antilles”

L'événement le plus marquant de l'année 2022 a été la réalisation des rencontres scientifiques « Volcanisme, sismicité et tectonique des Antilles », du 13 au 19 mai 2022 au Centre de Découverte des Sciences de la Terre (CDST) à Saint-Pierre (Martinique). Organisées par l'OVSM-IPGP autour de la restitution du projet Interreg PREST, cette manifestation a associé un congrès scientifique, l'inauguration du nouveau bâtiment de l'OVSM-IPGP, et des conférences publiques données par des experts internationaux des sciences de la Terre.

Plus de **70 scientifiques** (et une quarantaine à distance) en provenance du monde entier dont **13 pays et territoires de la Caraïbe** ont participé à ce congrès scientifique diffusé en direct. Au total, **84 conférences et posters scientifiques** ont été présentés. Deux journées étaient animées par des experts reconnus en volcanologie, puis en sismologie et tectonique régionale. Deux autres journées ont discuté des résultats obtenus par les acteurs du projet PREST :

- Sismicité et tectonique des Grandes Antilles
- Sismicité et déformation de l'arc des Petites Antilles
- Instrumentation et mesures en milieu marin
- Surveillance et fonctionnement des systèmes volcaniques

Une excursion a été organisée à la Montagne Pelée, guidée par les experts de l'IPGP en volcanologie.

Des conférences publiques ont rythmé la semaine pour présenter les dernières avancées scientifiques :

- L'histoire éruptive de la Montagne Pelée et sa réactivation actuelle (A. Michaud-Dubuy et F. Fontaine, OVSM/IPGP)
- La subduction des Antilles : état de l'art et défis scientifiques (J. Corbeau, OVSM/IPGP)
- L'éruption de la Soufrière de Saint-Vincent de 2020-21 (E. Joseph, SRC/UWI)
- Les catastrophes sismiques en contexte de développement : quelles leçons tirer du cas d'Haïti ? (E. Calais, ENS/IRD).
- Restitution publique du projet Interreg PREST (J.-B. De Chabalier, OVSM-IPGP)
- Table ronde des acteurs de l'alerte, de la gestion de crise et de l'urgence pour les risques naturels aux Antilles





Rapport annuel 2022

Observatoire volcanologique et sismologique de Martinique - IPGP



WP4 : Surveillance et fonctionnement des systèmes volcaniques : Action Modélisation de la dispersion des cendres dans le cadre du projet Interreg Caraïbes PREST (A; Michaud-Dubuy, J-C Komorowski, G. Carazzo, IPGP)

Dans le cadre du projet PREST (Interreg Caraïbes V), A. Michaud-Dubuy (IPGP et OPGC/LMV/UCA), J-C Komorowski (IPGP), et G. Carazzo (IPGP) ont mis en place une suite d'outils de simulation de la dispersion des cendres volcaniques avec le code éprouvé de simulation HAZMAP dans le cadre de différents scénarios éruptifs plausibles. La stratégie de modélisation est fondée sur une double approche.

L'approche déterministe permet de reproduire des éruptions passées connues géologiquement avec un modèle de vent unique pour paramétrer le modèle et s'assurer de la justesse des résultats de simulation par rapport aux données connues. Elle permet aussi, le jour d'une éventuelle éruption, de pouvoir simuler un scénario précis spécifique paramétré avec les données météorologiques et volcanologiques du moment. La simulation permet de cartographier dans l'espace les niveaux d'épaisseur de cendres attendues ou de charge pondérale (kg/m^2) au sol en tous les points de la grille de calcul représentant une large zone autour du volcan. L'approche probabiliste (illustrée ici en **Figure 43**) consiste à explorer l'espace de variabilité possible des paramètres volcanologiques et en la croisant de manière aléatoire avec la variabilité des paramètres météorologiques en utilisant tous les profils de vents de la base de données ERA5 de 1979 et 2021 pour la Martinique. L'approche probabiliste permet d'aborder la notion de précision et de quantifier l'incertitude par rapport aux caractéristiques d'une hypothétique éruption. La simulation permet de cartographier dans l'espace, la probabilité d'excéder, sur toutes les simulations réalisées et trois scénarios éruptifs, un certain niveau d'épaisseur ou de charge pondérale (kg/m^2) au sol en tous les points de la grille de calcul représentant une large zone autour du volcan. On choisit de représenter visuellement uniquement les isolignes qui représentent les 5 % de probabilité (intervalle de confiance utilisé classiquement) d'atteindre 1 mm, 1 cm, 5 cm, 10 cm, 13 cm, et 20 cm de cendres au sol sur la totalité de l'épisode éruptif en fonction de la magnitude du scénario retenu.



Rapport annuel 2022
Observatoire volcanologique et sismologique de Martinique - IPGP

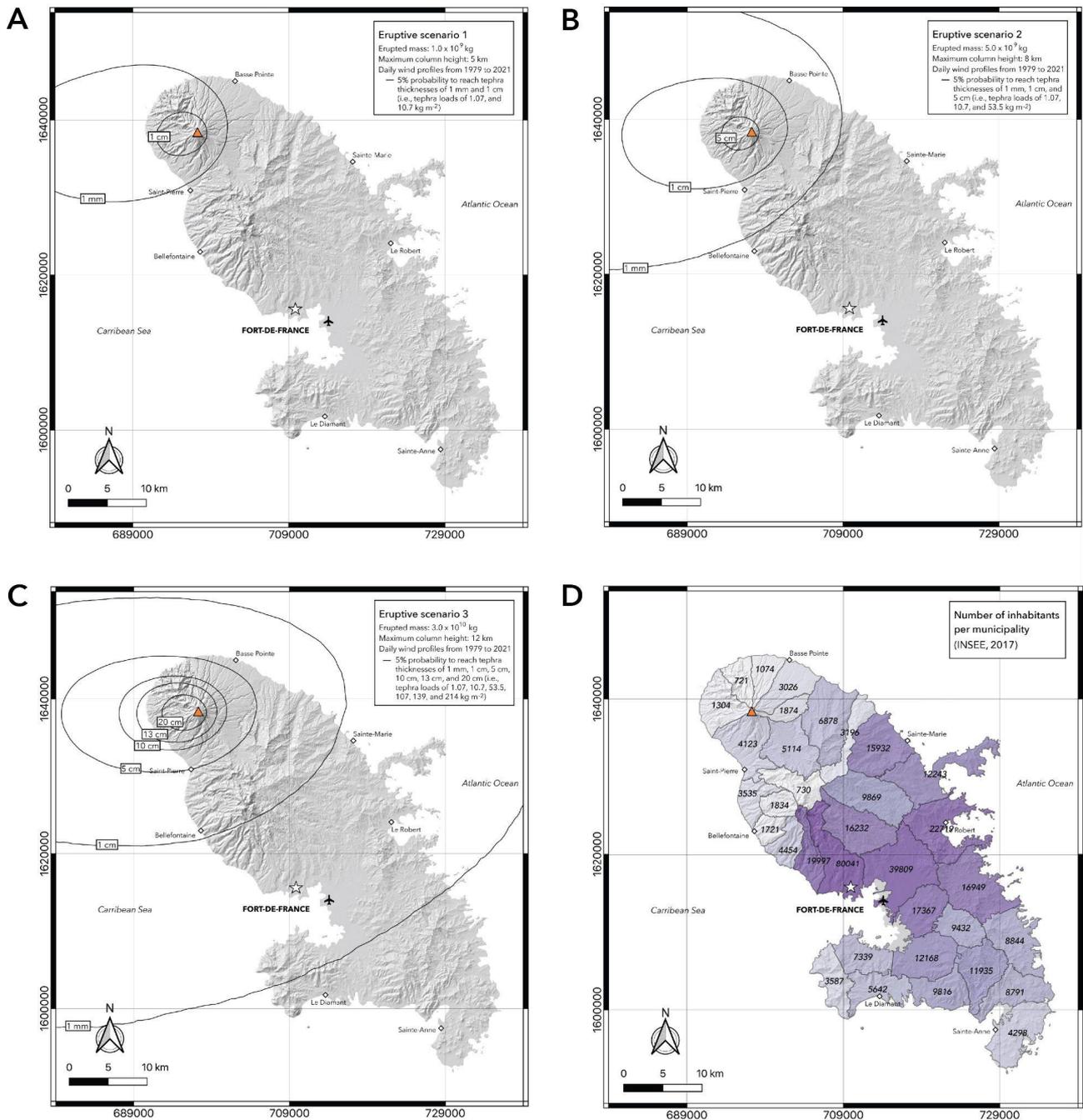


Figure 43. Cartes semi-probabilistes montrant les courbes d'isoprobabilité de 5% d'excéder différents niveaux de risques pour 3 scénarios d'éruptions phréatiques non-magmatiques pour la Montagne Pelée : A) scénario 1 (hauteur de colonne = 5 km, 1×10^9 kg de masse éruptée); B) scénario 2 (hauteur de colonne = 8 km, 5×10^9 kg de masse éruptée); et C) scénario 3 (hauteur de colonne = 12 km, 3×10^{10} kg de masse éruptée). Différents seuils de charge massique sont indiqués pour chaque scénario ; notez qu'un seuil manquant signifie qu'il n'a pas été atteint dans la simulation. Pour percevoir l'impact de tels scénarios éruptifs, la répartition de la population de la Martinique est donnée en D) (données de l'INSEE 2017 et BDTOP® IGN©).



Rapport annuel 2022

Observatoire volcanologique et sismologique de Martinique - IPGP

Ces niveaux critiques d'épaisseur correspondent à des seuils d'impacts et d'endommagement spécifiques définis sur la base de travaux par Pomonis et al. (1999), Bonadonna et al. (2005), Spence et al. (2005), Komorowski et al. (2008), Wilson et al. (2017) et Michaud-Dubuy et al. (2021). Le seuil d'épaisseur de 1 mm de cendres correspond à un seuil de maintenance requise sur les réseaux d'eau, d'électricité et de télécommunication (nécessité de nettoyage), et la fermeture de l'aéroport. Si le seuil de 1 cm d'épaisseur était atteint, les réseaux d'eau potable, d'électricité et de télécommunication pourraient nécessiter des réparations importantes, et il pourrait y avoir des difficultés à respirer et un impact sur la végétation et les cultures, la vitesse nominale sur les routes est réduite de >50%. Le seuil de 5 cm correspond à des dysfonctionnements majeurs à long terme du réseau du traitement des eaux usées, et à l'endommagement majeur de l'essentiel des équipements critiques. Quand on dépasse 10 cm de cendres, les réseaux systémiques doivent être remplacés et les routes sont impraticables pour certains véhicules. Avec 13 cm l'aéroport est entièrement recouvert. A partir de 20 cm, les routes sont impraticables pour tous les véhicules, les toits de charpentes en bois s'effondrent.

Ce travail a été soumis pour publication (Michaud-Dubuy et al., in review). Il a contribué aux scénarios éruptifs potentiels sur lequel a été élaboré le nouveau plan ORSEC Dispositif Spécial phénomènes volcanique, Montagne Pelée, réalisé par la Préfecture en 2021-2022.

WP5 : Plateforme Marine

L'OVSM-IPGP a fait l'acquisition au premier semestre 2021 d'une plateforme marine pour réaliser des cartographies marines en trois dimensions à haute résolution. Cette plateforme, composée d'un sondeur multifaisceaux et d'une centrale d'attitude et de positionnement, permet d'obtenir des résultats de cartographie 3D de haute définition avec une précision et une résolution d'ordre centimétrique. Ce matériel a la capacité de sonder les fonds marins jusqu'à environ 300 mètres de profondeur. Ces mesures vont permettre de suivre les phénomènes de lahars (coulées de boues torrentielles) dans la commune du Prêcheur, en estimant par exemple les apports de volumes de sédiments entre l'amont et l'aval de la rivière, mais également de continuer d'améliorer la connaissance de l'activité tectonique et de la topographie sous-marine locales.

Au cours de l'année 2022, de nombreuses campagnes hydrographiques ont été réalisées tout autour de la montagne Pelée. Au total, plus de 650 km de profils bathymétriques ont pu être cartographiés en 20 jours de campagne en mer cumulées. La zone cartographiée s'étend actuellement de Bellefontaine jusqu'à Cap Saint-Martin (**Figure 44**).

Avec la participation du LIENSs de La Rochelle, une bouée océanographique a été acquise en 2022 et sera mise à l'eau le 1^{er} mars 2023 dans la baie de Fort de France pour une durée maximale de 5 ans (**Figure 45**). La bouée réalisera des mesures (conductivité, température, turbidité, pH, oxygène dissous et Chl-a) toutes les 15 minutes, visualisables sur un site internet accessible à tous.

L'OVSM-IPGP possède également pour compléter sa plateforme marine un ROV de chez Deep Trekker capable d'effectuer des inspections de câbles, des prises d'échantillons sédimentaires et d'eaux jusqu'à 200m de profondeur (**Figure 46**). Les premiers essais seront réalisés au cours de l'année 2023.



Rapport annuel 2022
Observatoire volcanologique et sismologique de Martinique - IPGP



Figure 44 : Cartographie des fonds marins acquise avec le sondeur multifaisceaux du projet PREST le long de la côte nord Caraïbe.

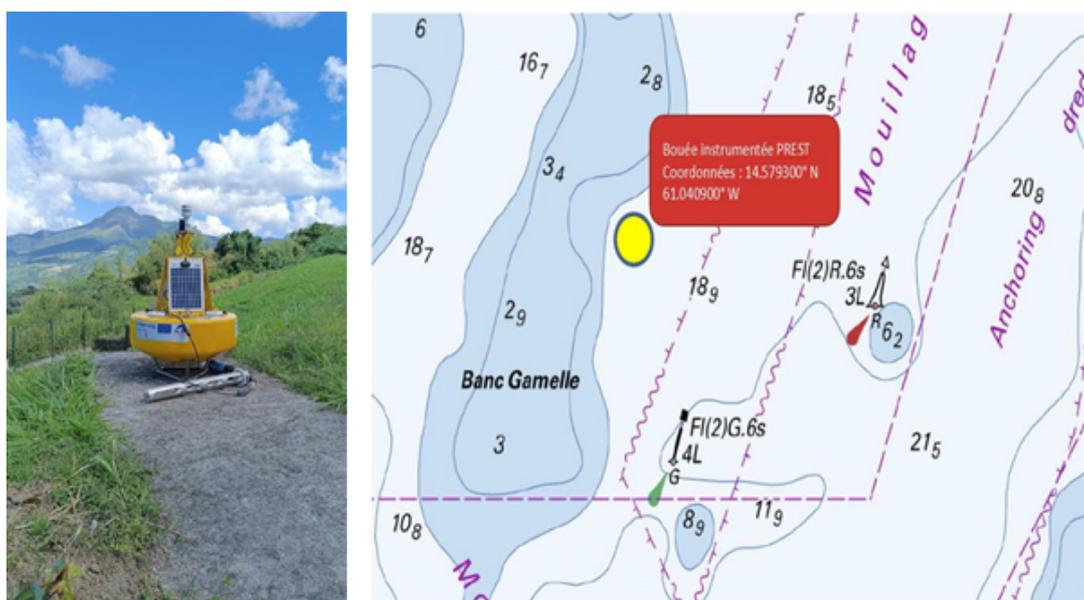


Figure 45 : Bouée océanographique et implantation de la bouée à Fort de France



Figure 46 : ROV DTG 3 avec ses accessoires.

WP7 : Instrumentation sous-marine en temps réel

L'amélioration de la connaissance des aléas sismique, volcanique et de tsunami qui menacent la Caraïbe nécessite de développer des réseaux de mesures en fond de mer, afin de s'approcher des sources (failles, volcans, mouvements de terrains), souvent immergées au large des îles. Depuis des années, l'observation des fonds océaniques repose sur une instrumentation s'appuyant sur des navires de surface et fonctionnant pendant de courtes durées (quelques semaines à quelques mois). Ces observations ne suffisent plus. Pour comprendre les phénomènes géophysiques et élaborer des modèles, il faut disposer de surveillance sous-marine en continu.

Le projet PREST a relevé un défi audacieux : développer une série de trois prototypes de capteurs innovants en bout de fibre optique, pour les faire fonctionner dans des conditions de surveillance opérationnelle en temps réel, dans l'observatoire sous marin expérimental des Saintes (Guadeloupe), localisé à 5 kilomètres de distance au sud de l'île de Terre de Bas et 43 m de profondeur.

En **juin 2021**, une première campagne océanographique avait permis de déployer le câble optique de 5 km de longueur depuis le port de l'Anse des Mûriers et un sismomètre fond de mer dont les données sont transmises en temps réel (**Figure 47**). Après un an et demi d'enregistrements de la sismicité de la zone des Saintes, le sismomètre confirme la réussite des capteurs en bout de fibre développés par l'IPGP et l'ESEO, pour comprendre le fonctionnement des failles immergées.

Du **3 au 13 décembre 2022**, deux nouveaux capteurs développés par l'ENS, un inclinomètre et un pressiomètre optiques qui mesurent respectivement la déformation du fond marin et la pression hydrostatique, étaient prêts à être installés. La campagne n'a pas permis de les déployer, car les réparations réalisées sur les connecteurs, les boîtes d'étanchéité et les câbles endommagés ont pris tout le temps de la campagne. Ces nouveaux capteurs seront implantés ultérieurement.



Rapport annuel 2022

Observatoire volcanologique et sismologique de Martinique - IPGP

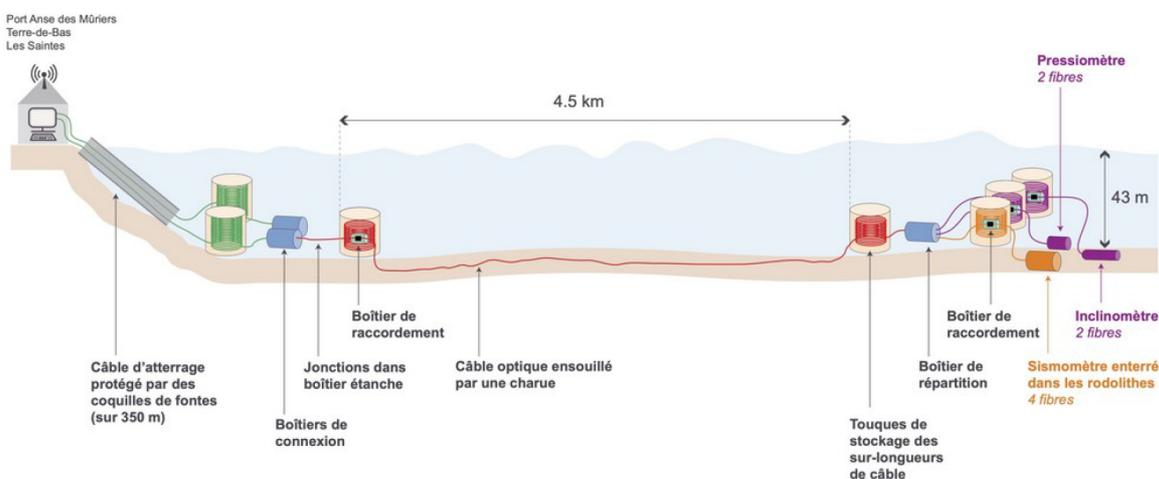
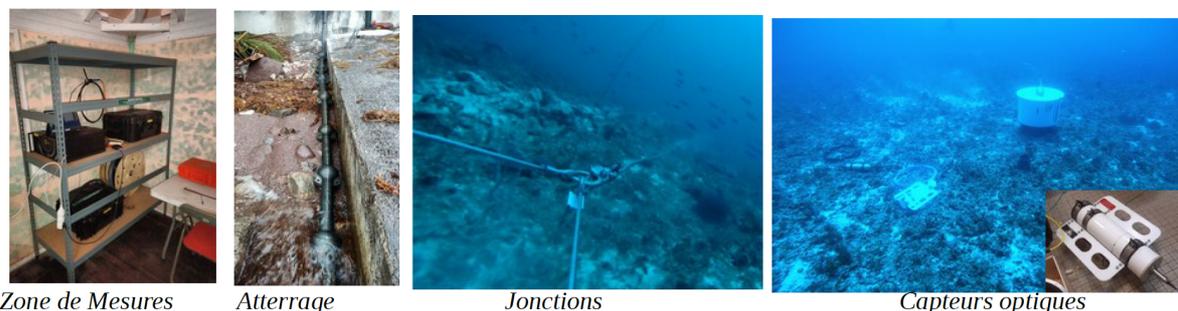


Figure 47 : Schéma d'implantation de l'observatoire optique fond de mer des Saintes. L'interrogateur laser installé dans le port de l'Anse des Mûrier (à gauche) mesure à distance les mouvements du sismomètre (à droite), localisé plus près des sources sismiques. La centrale d'acquisition transmet les données en temps réel aux observatoires volcanologiques, pour comprendre la sismicité persistante de la zone des Saintes, fortement touchée le 4 novembre 2004 par un séisme destructeur de magnitude 6.4.

Publications PREST en 2022

- Calais E., S. Symithe, T. Monfret, B. Delouis, A. Lomax, F. Courboux, J.-P. Ampuero, P.E. Lara, Q. Bletery, J. Chêze, F. Peix, A. Deschamps, B. de Lépinay, B. Raimbault, R. Jolivet, S. Paul, S. St Fleur, D. Boisson, Y. Fukushima, Z. Duputel, L. Xu and L. Meng, (2022), Citizen seismology helps decipher the 2021 Haiti earthquake. *Science*, 10.1126. <https://www.science.org/doi/10.1126/science.abn1045>.
- Cordrie L., N. Feuillet, A. Gailler, M. Biguenet, E. Chaumillon and P. Sabatier, (2022). A megathrust earthquake as source of a pre-columbian tsunami in Lesser Antilles: Insight from sediment deposits and tsunami modeling. *Earth-Sciences Rev.*, 228, 104018. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2022.104018>.
- Douilly, R., S. Paul, T. Monfret, A. Deschamps, D. Ambrois, S. J. Symithe, S. St Fleur, F. Courboux, E. Calais, D. Boisson, B. Mercier de Lépinay, Y. Font and J. Chêze. (2022). Rupture segmentation of the 14 August 2021 Mw 7.2 Nippes, Haiti, earthquake using aftershock relocation from a local seismic deployment, *Bull. Seismol. Soc. Am.* 113, 58–72. <https://doi.org/10.1785/0120220128>.
- Henri, M., X. Quidelleur, A. Le Friant, J.-C. Komorowski, J. Escartin, C. Deplus and C. Mevel (2022). K-Ar geochronology and geochemistry of underwater lava samples from the Subsaintes cruise offshore Les Saintes (Guadeloupe): Insight for the Lesser Antilles arc magmatism. *Marine Geol.* 450 (2022) 106862. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2022.106862>.
- Moune S., R. Moretti, A. Burtin, D.E. Jessop, T. Didier, V. Robert, M. Bonifacie, G. Tamburello, J.C. Komorowski, P. Allard and M. Buscetti (2022). Gas Monitoring of Volcanic-Hydrothermal Plumes in a Tropical Environment: The Case of La Soufrière de Guadeloupe Unrest Volcano (Lesser Antilles). *Front. Earth Sci.* 10:795760. <https://doi.org/10.3389/feart.2022.795760>.



Rapport annuel 2022

Observatoire volcanologique et sismologique de Martinique - IPGP

- Philibosian, B., N. Feuillet, J. Weil-Accardo, E. Jacques, A. Guihou, A.-S. Mériaux, A. Anglade, J.-M. Saurel and S. Deroussi (2022). 20th-century strain accumulation on the Lesser Antilles megathrust based on coral microatolls. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 579, 117343. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2021.117343>.
- Poulain, P., A. Le Friant, A. Mangeney, S. Viroulet, E. Fernandez-Nieto, M. Castro Diaz, M. Peruzzetto, G. Grandjean, F. Bouchut, R. Pedreros and J.-C. Komorowski. (2022). Performance and limits of a shallow-water model for landslide-generated tsunamis: from laboratory experiments to simulations of flank collapses at Montagne Pelée (Martinique), *Geophys. J. Int.* (2023) 233, 796–825. <https://doi.org/10.1093/gji/ggac482>.
- Villemant B., A. Le Friant, B. Caron, G. Del Manzo, S. Lafuerza, L. Emmanuel, O. Ishizuka, H. Guyard, N. Labourdette, A. Michel and S. Hidalgo, (2022). A 1.5 Ma marine record of volcanic activity and associated landslides offshore Martinique (Lesser Antilles): Sites U1397 and U1399 of IODP 340 Expedition. *Front. Earth Sci.*, 10, 767485, <https://doi.org/10.3389/feart.2022.767485>.
- Van Rijnsingen, E.M., E. Calais, R. Jolivet, J.-B. de Chabaliere, R. Robertson, G.A. Ryan and S. Symithe, 2022. Ongoing tectonic subsidence in the Lesser Antilles subduction zone, *Geophys. J. Int.*, 231, 319-326. <https://doi.org/10.1093/gji/ggac192>.
- Weil-Accardo, J., N. Feuillet, B. Philibosian, A. Guihou, E. Jacques, G. Cabioch, A. Anglade, A.-S. Meriaux and P. Deschamps (2022). Interaction between climate and tectonics in the Northern Lesser Antilles inferred from the Last Interglacial shoreline on Barbuda, *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 23, e2021GC010045. <https://doi.org/10.1029/2021GC010045>.

Réseau temporaire de nodes

Après l'enregistrement d'une augmentation de l'activité sismique de la Montagne Pelée à la fin de l'année 2019 et le passage de l'alerte au niveau jaune en décembre 2020, un réseau temporaire de nodes (capteurs sismologiques) a été déployé durant un mois en avril 2021 afin notamment d'améliorer la localisation des séismes volcano-tectoniques. Cependant, cette campagne n'a pas permis d'enregistrer suffisamment de données, principalement dû à la courte période d'installation du réseau. C'est pourquoi une nouvelle campagne de collecte de données est en cours, avec le déploiement d'un nouveau réseau de nodes temporaires pour une période d'une année. Ce projet a débuté en septembre 2022.

Ce nouveau réseau de nodes est composé de 3 antennes comprenant chacune 8 stations. Chaque station contient un node (**Figure 48**), un géophone compact et autonome, disposant de sa propre antenne GPS et de sa batterie, qui enregistre des vibrations verticales, horizontales-nord, et horizontales-est. Les stations sont réparties sur le terrain en spirale (**Figure 49**) afin d'optimiser la reconstitution du champ d'onde (distances et angles différents en fonction du point central).

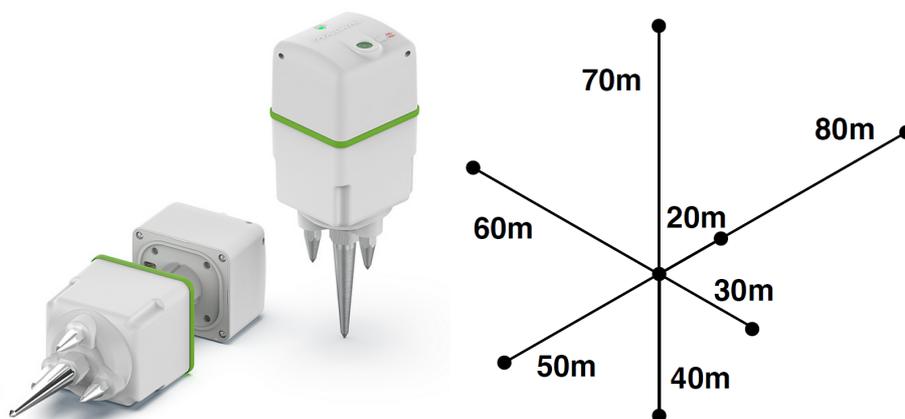


Figure 48 : Node (SmartSolo IGU-16H3 3C) et disposition en spirale des stations dans une antenne.

Lors de la première campagne en 2021, deux antennes étaient installées à proximité de carrières et les activités quotidiennes de celles-ci étaient enregistrées par les stations, perturbant ainsi le signal.

Pour cette nouvelle campagne de 2022, le déploiement du réseau a donc commencé par la prospection sur le terrain afin de trouver des sites adaptés répondant aux critères suivants :

- proche des épicentres des événements volcano-tectoniques ;
- facilement accessible pour la récupération des données ;
- suffisamment vaste pour déployer les 8 stations.



Rapport annuel 2022

Observatoire volcanologique et sismologique de Martinique - IPGP

La prospection a été d'abord réalisée par l'analyse d'images satellites, puis par une visite sur le terrain pour vérifier que toutes les conditions étaient réunies. Après ces étapes, trois sites sur la Montagne Pelée ont été retenus (**Figure 49**) : Grande Savane (**GSA**), Morne Lacroix (**LAM**) et Pécol (**PEC**).

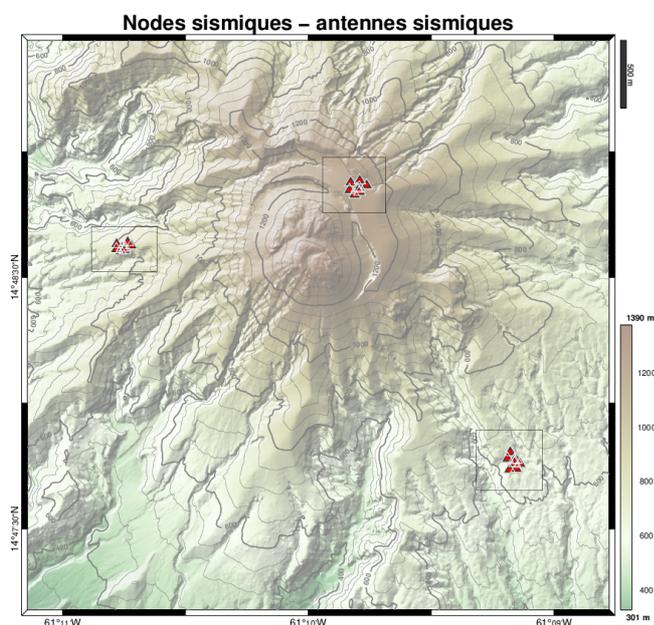


Figure 49 : Disposition des antennes (GSA, LAM, PEC) autour du sommet de la Montagne Pelée.

Les 3 antennes ont été déployées aux dates suivantes : Pécol (**PEC**), le 30 novembre 2022 (**Figure 50**, gauche), Grande Savane (**GSA**), le 7 décembre 2022 (**Figure 50**, centre), et enfin Morne Lacroix (**LAM**), le 15 décembre 2022 (**Figure 50**, droite).

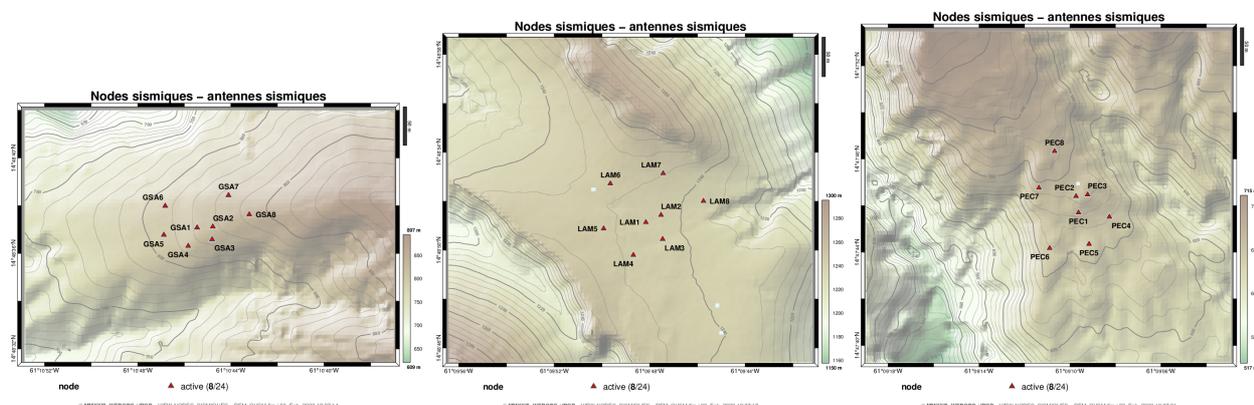


Figure 50 : Position des 8 stations au sein de chaque antenne : GSA à gauche, LAM au centre, et PEC à droite.

La batterie des nodes ayant une autonomie d'environ 4 semaines, il est nécessaire de se rendre sur les antennes au cours de la quatrième semaine de fonctionnement afin d'effectuer une rotation des nodes sur chaque station pour éviter une perte de données.

Les capteurs récupérés sur une antenne sont ramenés à l'observatoire et leurs données enregistrées au cours des semaines de fonctionnement sont extraites. Les métadonnées sont ensuite traitées afin d'être mises en conformité :

- Nom de réseau : 2R
- Nom des stations : GSAx, LAMx et PECx (avec x le numéro correspondant à la station (1 à 8))
- Code localisation : 00
- Code canal : DPx (avec x valent E, N ou Z en fonction du canal)



Rapport annuel 2022

Observatoire volcanologique et sismologique de Martinique - IPGP

Une fois les métadonnées traitées, les fichiers sont organisés au format SDS (SeisComp Data Structure).

Le réseau temporaire de nodes a été déployé à la fin de l'année 2022 et peu d'événements volcano-tectoniques ont été enregistrés pour le moment (**Figure 51**). Au cours de l'année 2023, les données enregistrées seront régulièrement traitées par différents algorithmes et analysées. L'étude de ces données permettra d'améliorer les connaissances sur la Montagne Pelée, par exemple en relocalisant les foyers des différents séismes d'origine volcano-tectoniques, permettant une meilleure compréhension de la structure interne du volcan.

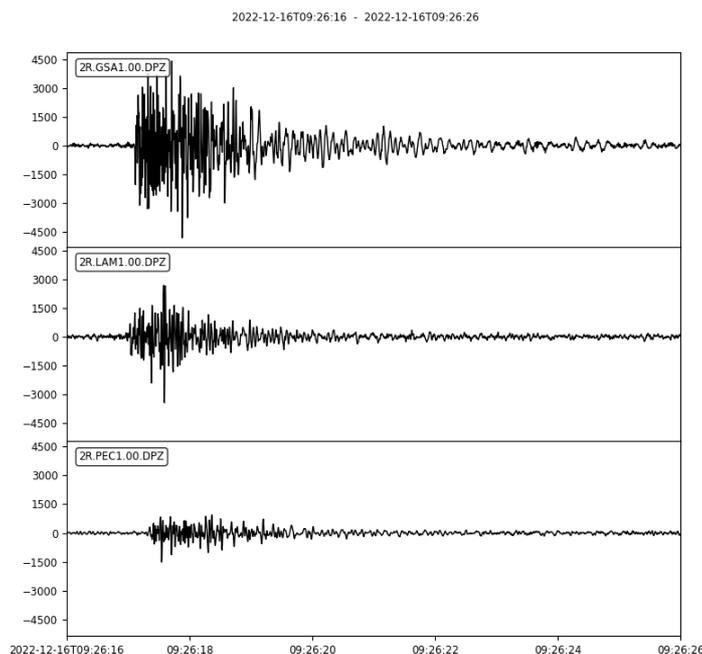


Figure 51 : VT du 16/12/2022, composante verticale des stations centrales des antennes.

Travaux de recherche en cours

Analyse spatio-temporelle de la sismicité ressentie en Martinique

Entre **1982 et 2022**, ce sont **323 séismes** tectoniques qui ont été **ressentis en Martinique** et qui ont fait l'objet d'un communiqué de la part de l'OVSM IPGP (**Figure 52**), soit en moyenne **7,8** séismes ressentis chaque année.

Au cours du mois de juillet 2022, Sarah Thuillier, étudiante en 1^{ère} année à l'EOST (Strasbourg), a effectué un stage ouvrier à l'OVSM sous l'encadrement de Jordane Corbeau. Elle a entamé un travail d'analyse spatio-temporelle de la sismicité ressentie en Martinique, en étudiant notamment la répartition des événements entre les ruptures *intra-plaque*, *inter-plaque* et de profondeur intermédiaire. Elle a également analysé la temporalité des ruptures de profondeur intermédiaire et montré que certaines zones du panneau plongeant de la subduction (environ 150 km de profondeur) semblaient produire des séismes ressentis de façon cyclique (**Figure 53**). Ce travail est poursuivi en 2023 par Jordane Corbeau et devrait permettre des avancées dans la compréhension des processus de rupture sismique le long du panneau plongeant de la subduction.



Rapport annuel 2022

Observatoire volcanologique et sismologique de Martinique - IPGP

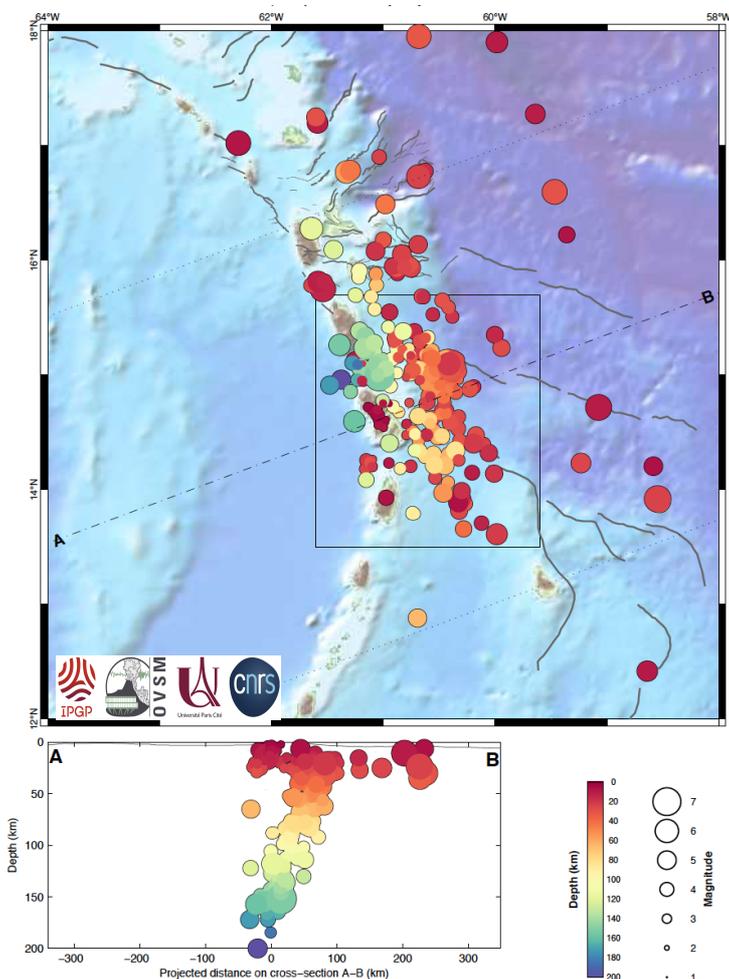


Figure 52 : Partie supérieure : carte des épacentres des séismes enregistrés et localisés par l'OVSM-IPGP et qui ont été ressentis en Martinique entre 1982 et 2022. Partie inférieure : représentation des hypocentres des séismes en fonction de la profondeur, suivant le profil A-B indiqué sur la carte.

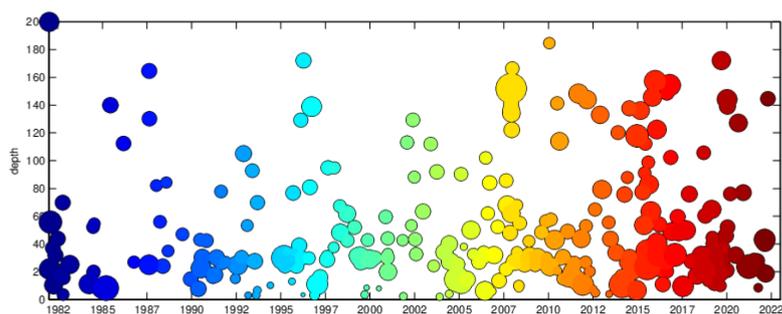


Figure 53 : répartition des séismes ressentis en Martinique entre 1982 et 2022 en fonction de la profondeur.



Rapport annuel 2022

Observatoire volcanologique et sismologique de Martinique - IPGP

Mécanismes au foyer des séismes volcano-tectoniques de la Montagne Pelée

La majorité des séismes enregistrés par l'OVSM sous la Montagne Pelée via ses réseaux de stations sismologiques permanentes et temporaires est de type volcano-tectonique (VT). Ces événements, associés à des processus de micro-fracturation dans l'édifice volcanique, sont caractérisés par un signal contenant des hautes fréquences. La détermination des mécanismes au foyer des séismes VT est importante pour la compréhension du champ de contrainte de l'édifice volcanique.

Lors du premier semestre 2022, Aurélie Filliaert, étudiante en master 1 à l'IPGP, a effectué son stage de recherche à l'OVSM sous l'encadrement de Jordane Corbeau. L'objectif de son stage était de calculer les mécanismes au foyer des séismes VT émis par la Montagne Pelée durant ces derniers mois, en utilisant une méthode d'inversion de la polarité des ondes P et des rapports d'amplitudes S/P (Hardebeck and Shearer, 2002). 18 séismes de type VT ont pu être analysés durant la durée de ce stage et les résultats sont encourageants (**Figure 54**).

Ce travail est poursuivi en 2023 par Jordane Corbeau, en collaboration avec Lise Rétaillieu de l'Observatoire volcanologique du Piton de la Fournaise (OVPF IPGP, La Réunion). Les résultats devraient permettre de comprendre les processus physiques à l'origine de ces événements VT. Les plans de ruptures et les axes de compression P des VT ainsi déterminés pourront indiquer si nous sommes dans une dynamique d'intrusion magmatique, d'augmentation de la pression de pores par addition de gaz et/ou de chaleur dans le système hydrothermal (Roman and Cashman, 2006), ou s'ils reflètent la contrainte tectonique maximale régionale engendrée par la subduction.

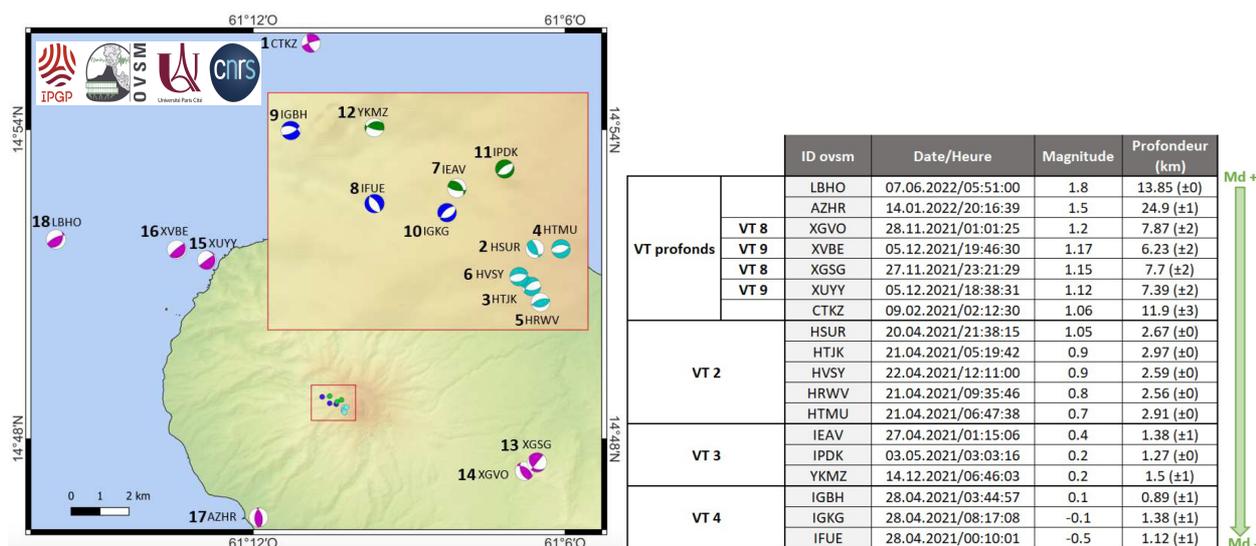


Figure 54 : Mécanismes au foyer pour 18 séismes VT de la Montagne Pelée enregistrés entre le 09 février 2021 et le 07 juin 2022. Les numéros sur la carte indiquent l'ordre temporel d'apparition de ces événements.

Projets ANR

En 2022, deux projets ANR dans lesquels est impliquée Jordane Corbeau ont vu leur financement accepté et débiteront au premier semestre 2023 :

- le projet **CAST** (*Caribbean Active SeismoTectonics*), mené par Chastity Aiken de l'Ifremer ;
- le projet **SOFT** (*Subduction of Oceanic FracTures zones*), mené par Cécile Prigent de l'IPGP.

Le projet **CAST** va investiguer en détails la dynamique du système de failles décrochantes actives qui compose la frontière nord de la plaque Caraïbe, entre Cuba, la Jamaïque et l'île d'Hispaniola. Deux séismes dévastateurs ont frappé le sud d'Haïti en 2010 (M 7.0, Léogâne) et en 2021 (M 7.2, Les Nippes), et ont rappelé que l'activité de ce système de failles actif restait mal connue.



Rapport annuel 2022

Observatoire volcanologique et sismologique de Martinique - IPGP

Le projet **CAST** va s'atteler à analyser en détails l'architecture de ce système de faille et son mode de glissement, en se basant notamment sur les données qui seront acquises durant une campagne en mer à venir (Haïti-TWIST). Les différents travaux de ce projet seront entamés en 2023 et permettront des avancées scientifiques dans la compréhension des risques sismiques et de formation de tsunamis de la frontière nord de la plaque Caraïbe, régulièrement impactée par des séismes majeurs superficiels.

Le projet **SOFT** analysera notamment l'impact de la subduction des zones de fractures océaniques dans la variation spatio-temporelle de la sismicité et de l'activité magmatique des édifices volcaniques de l'arc des Petites Antilles. En effet, des observations géophysiques et géochimiques récentes ont montré que les zones de fractures océaniques ont une influence sur la dynamique magmatique et sismique des zones de subductions (Cooper et al., 2020) : pour une subduction donnée, les zones où subduisent les fractures sont par exemple caractérisées par une sismicité plus importante (Schlaphorst et al., 2016), des essaims de séismes superficiels ou profonds (Corbeau et al., 2021), et un couplage plus faible de la zone sismogénique (Metois et al., 2016 ; Moreno et al., 2014). Les zones de fracture semblent également impacter la dynamique de rupture des zones sismogéniques en agissant sur la nucléation, la propagation et la magnitude des séismes majeurs. Certaines études suggèrent que les zones de fractures océaniques agissent comme des aspérités, favorisant la génération de séismes majeurs (eg. Contreras-Reyes and Carrizo, 2011), tandis que d'autres proposent qu'elles agissent comme des barrières limitant la propagation de la rupture et donc la magnitude du séisme (eg. Poli et al., 2017). La subduction des zones de fractures océaniques semble aussi influencer l'activité magmatique de la plaque supérieure, en favorisant une croûte supérieure plus épaisse et des laves avec des compositions géochimiques différentes (eg. Cooper et al., 2020).

Les différents travaux de ce projet seront entamés en 2023 et permettront des avancées scientifiques dans la compréhension de l'impact de la subduction des zones de fractures océaniques dans la dynamique sismique et volcanique de l'arc des Petites Antilles, et dans sa capacité à produire des mégaséismes de subduction.



Références

- Bonadonna, C.**, Connor, C., Houghton, B., Connor, L., Byrne, M., Laing, A., & Hincks, T., 2005. Probabilistic modeling of tephra dispersal: Hazard assessment of a multiphase rhyolitic eruption at Tarawera, New Zealand. *J. Geophys. Res.* 110 (B03203).
- Boudon, G.**, Le Friant, A., Villemant, B., and Viodé J.-P., 2005, Martinique, In *Volcanic Hazard Atlas of the Lesser Antilles* by J. Lindsay et al., 126-145.
- Contreras-Reyes, E.**, Carrizo, D., 2011. Control of high oceanic features and subduction channel on earthquake ruptures along the Chile–Peru subduction zone. *Physics of the Earth and Planetary Interiors* 186, 49–58.
- Cooper, G.F.**, Macpherson, C.G., Blundy, J.D., Maunder, B., Allen, R.W., Goes, S., Collier, J.S., Bie, L., Harmon, N., Hicks, S.P., 2020. Variable water input controls evolution of the Lesser Antilles volcanic arc. *Nature* 582, 525–529.
- Corbeau J.**, O. Gonzalez, N. Feuillet, A.-M. Lejeune, **F.R. Fontaine**, V. Clouard, J.-M. Saurel and the **OVSM team**, 2021, A significant Increase in Interplate Seismicity near Major Historical Earthquakes Offshore Martinique (FWI), *Bulletin of the Seismological Society of America*, <https://doi.org/10.1785/0120200377>.
- Deparis, J.D.**, Jongmans, D., Cotton, F., Baillet, L., Thouvenot, F., and D. Hantz, 2007, Analysis of rock-fall seismograms in the western Alps, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 98, 1781-1796.
- Fontaine, F. R.**, Roult, G., Michon, L., Barruol, G., and Di Muro, A., 2014, The 2007 eruptions and caldera collapse of the Piton de la Fournaise volcano (La Réunion Island) from tilt analysis at a single very broadband seismic station, *Geophysical Research Letters*, 41, 2803-2811, doi : 10.1002/2014GL059691.
- Hardebeck, Jeanne L.** and Peter M. Shearer, 2002, A new method for determining first-motion focal mechanisms, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 92, 2264-2276.
- Hibert, C.**, 2012, Apport de l'écoute sismique pour l'étude des éboulements du cratère Dolomieu, Piton de la Fournaise (île de la Réunion), *Ph.D. thesis*, 195 pp., Inst. de Phys. du Globe de Paris, Paris.
- Hirn, A.**, Girardin, N., Viodé, J. P., and Eschenbrenner, S., 1987, Shallow seismicity at Montagne Pelée volcano, Martinique, Lesser Antilles. *Bulletin of volcanology*, 49(6), 723-728.
- Komorowski, J.-C.**, Legendre, Y., Caron, B., & Boudon, G., 2008. Reconstruction and analysis of sub-plinian tephra dispersal during the 1530 AD Soufrière (Guadeloupe) eruption: Implications for scenario definition and hazard assessment. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 178, 491-515.
- Metois, M.**, Vigny, C., Socquet, A., 2016. Interseismic coupling, megathrust earthquakes and seismic swarms along the Chilean subduction zone (38–18 S). *Pure and Applied Geophysics* 173, 1431–1449.
- Michaud-Dubuy, A.**, Carazzo, G. & Kaminski, E. Volcanic hazard assessment for tephra fallout in Martinique. *Journal of Applied Volcanology*, 1–20 (2021). doi:10.1186/s13617-021-00106-7
- Michaud-Dubuy, A.**, Komorowski, J.-C. & Carazzo, G., in review. Tephra dispersal modeling of phreatic eruptions: Implications for volcanic hazard assessment in Martinique and Guadeloupe (Lesser Antilles). *J. Volcanol. Geotherm. Res.*
- Moreno, M.**, Haberland, C., Oncken, O., Rietbrock, A., Angiboust, S., Heidbach, O., 2014. Locking of the Chile subduction zone controlled by fluid pressure before the 2010 earthquake. *Nature Geoscience* 7, 292–296.
- Poli, P.**, Jeria, A.M., Ruiz, S., 2017. The Mw 8.3 Illapel earthquake (Chile): Preseismic and postseismic activity associated with hydrated slab structures. *Geology* 45, 247–250.
- Pomonis, A.**, Spence, R., & Baxter, P., 1999. Risk assessment of residential buildings for an eruption of Furnas Volcano, Sao Miguel, the Azores. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 92, 107-131.
- Roman, D. C.**, & Cashman, K. V. (2006). The origin of volcano-tectonic earthquake swarms. *Geology*, 34(6), 457-460.
- Rousseau, N.** 1999, Study of seismic signal associated with rockfalls at 2 sites on the Réunion Island (Indian Ocean): Mahavel Cascade and Soufriere cavity, *Ph.D. thesis*, 134 pp., Inst. de Phys. du Globe de Paris, Paris.



Rapport annuel 2022

Observatoire volcanologique et sismologique de Martinique - IPGP

Schlaphorst, D., Kendall, J.-M., Collier, J.S., Verdon, J.P., Blundy, J., Baptie, B., Latchman, J.L., Massin, F., Bouin, M.-P., 2016. Water, oceanic fracture zones and the lubrication of subducting plate boundaries—insights from seismicity. *Geophysical Journal International* 204, 1405–1420.

Spence, R., Komorowski, J.-C., Saito, K., Brown, A., Pomonis, A., Toyos, G. & Baxter, P., 2008. Modeling the impact of a hypothetical sub-Plinian eruption at La Soufrière de Guadeloupe (Lesser Antilles). *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 178, 516-528.

Yamada, M., H. Kumagai, Y. Matsushi, and T. Matsuzawa, 2013, Dynamic landslide processes revealed by broadband seismic records, *Geophys. Res. Lett.*, 40, 2998-3002, doi:10.1002/grl.50437.

Wilson, G., Wilson, T.W., Deligne, N.I., Blake, D.M. & Cole, W.C., 2017. Framework for developing volcanic fragility and vulnerability functions for critical infrastructure. *J. Applied. Volcanology* 6, 14.

VIGILANCE

— Bilan hebdo activité
 — Bulletin mensuel activité
 — Niveau de référence (pas d'alerte)

Attaque acide de la corde de canyoning Rivière Claire alt 655m
 04-12-2020

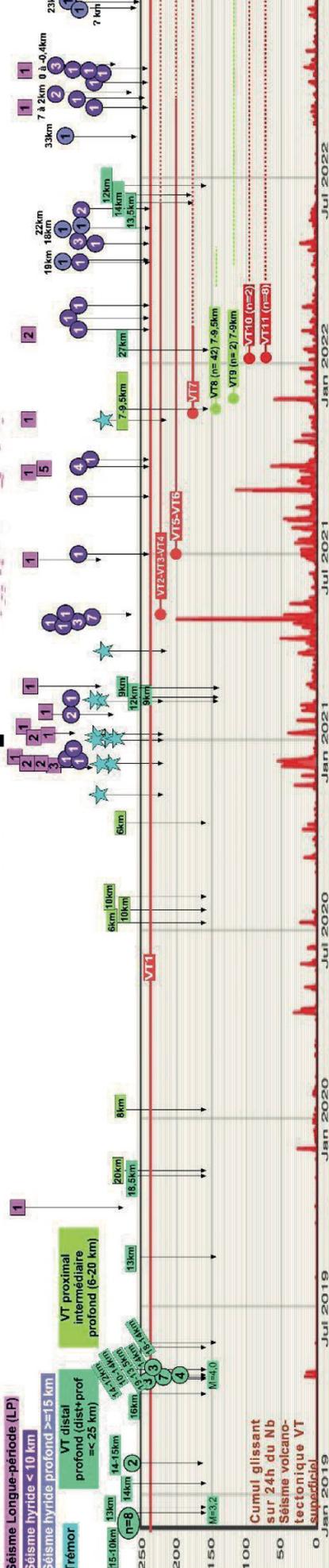
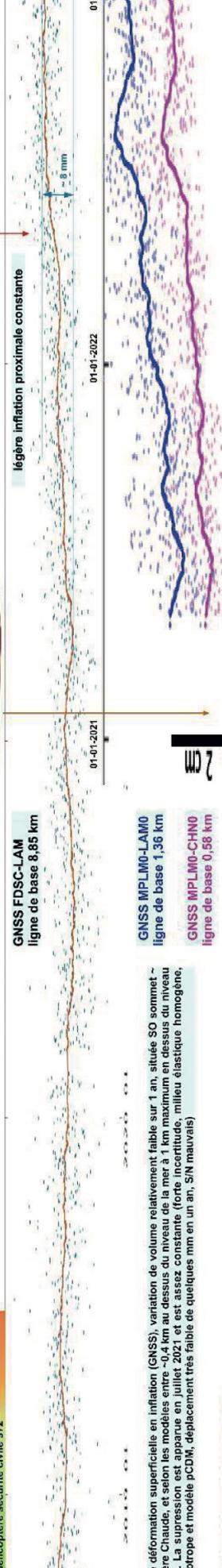
Dégazage significatif CO₂ ?
 plusieurs points sortie bulles en mer Fond Coré... à -11 m profondeur, 50 m côté

Puise de CO₂ remonte en surface via structures pré-établies via forage du Prêcheur. Origine ?
 2022-06-21: Nouveau site de dégazage en mer aux Abymes au Prêcheur avec observation de petites bulles à moins de 10 m de la côte et moins 6 m de profondeur (CO₂ ?).
 2022-05 à 2022-06: Dégazage en CO₂ 7000-45000 ppm forage Rivière Prêcheur

Puise de CO₂ -> Dégazation/ mort de la végétation VEG1 + fractures ? + VEG2
 Analyse NDVI images satellite Sentinel-2, Planets et observations depuis l'OVSM-IPGP et survol hélicoptère sécurité civile 372

rupture 27-12-2020
 H₂S
 SO₄²⁻/Cl⁻ -> 1,79 (ref: 0,4)
 H₂S
 rupture fin mars 2019

Date début détectée imagerie satellite (ESA-CHES) Sentinel-2 NDVI 30-12-2019
 le 08-02-2021: fractures récentes observées + dégazage CO₂ date début inconnue: 0,76% vol. (7800 ppm), ref. atmos -0,04% vol. (400 ppm) VEG1: vue le 26-12-2020
 VEG2, VEG3, VEG4, VEG5 vue le 22-03-2021
 VEG2, VEG4, VEG5 vue le 16-06-2022



Source de déformation superficielle en inflation (GNSS), variation de volume relativement faible sur 1 an, située SO sommet ~ sous Rivière Chaud, et selon les modèles entre ~0,4 km au dessus du niveau de la mer à 1 km maximum en dessus du niveau de la mer. La suppression est apparue en juillet 2021 et est assez constante (forte incertitude, milieu élastique homogène, modèle isotope et modèle pCDM, déplacement très faible de quelques mm en un an, S/N mauvais)