ISSN 2105-2301

Rapport annuel 2023

Observatoire volcanologique et sismologique de Martinique - IPGP

Institut de physique du globe de Paris, OVSM
Lieu-dit Blondel, Morne la Rosette, Route de l'observatoire, 97250 Saint Pierre, Martinique - www.ipgp.fr/ovsm
twitter : @ObsMartinique - facebook : ObsVolcanoSismoMartinique - youtube : Chaîne IPGP

Sommaire

Sommaire **2**
Présentation de l'observatoire **5**
Couverture 5
Citation de ce rapport 5
Remerciements 5
Personnels 5
> à l'observatoire en Martinique 5
> à Paris (équipe de direction) 6
Résumé **6**
Activité de la Montagne Pelée 6
Activité sismique régionale 7
Instrumentation 7
Divers 8
Introduction **8**
Activité de la Montagne Pelée **10**
Introduction 10
Activité sismique 10
Sismicité depuis 1995 11
Niveau de base de la sismicité VT 12
Activité sismique de l'année 2023 13
Déformation du sol 20
GNSS Permanents et de répétition 20
Inclinométrie 23
Suivi géochimiques des sources thermales de la Montagne Pelée et de la rivière du Prêcheur 24
Forage de Puits Chaud continu 24
Forages des carrières FCR1 et FCR2 25
Rivière du Prêcheur 27
Sources chaudes et rivière Chaude 27
Forage du Prêcheur 29
Bilan des mesures géochimiques du dégazage de la Montagne Pelée 30
Phénoménologie 30
Zone de végétation dégradée 30
Dégazage en mer 34
Glissements de terrain et lahars 36

Glissements de terrain 36
Lahars 37
Synthèse de l'activité de la Montagne Pelée 38
Activité locale et régionale 39
Contexte tectonique 39
Activité sismo-tectonique 41
Sismicité ressentie 44
Déformation régionale 46
Activité volcanique de l'arc des Petites Antilles 47
Réseaux de surveillance et d'études 48
Réseau sismologique régional des Petites Antilles 49
Réseau sismologique local 50
Présentation du réseau 50
Interventions en 2023 51
Réseau accélérométrique 52
Présentation du réseau 52
Interventions en 2023 53
Réseau de mesures des déformations du volcan 54
Présentation du réseau 54
Interventions en 2023 54
Réseau de surveillance des paramètres géochimiques 55
Présentation du réseau 55
Interventions en 2023 55
Réseau de surveillance de la rivière du Prêcheur 56
Présentation du réseau 56
Interventions en 2023 56
Réseau de communication des données de stations 57
Le réseau VSAT 57
Le réseau 57
Alimentation électrique des stations 58
Archivage et distribution des données 58
Infrastructures, bâtiments et véhicules 59
Électricité 59
Climatisation 59
Étanchéité 60

Incidents 60
Incendie du 18 mai 2023 60
Désordres dans la structure du bâtiment 61
Véhicules 61
Ancien observatoire du Morne des Cadets 62
Activités diverses de l'OVSM 62
Formations, missionnaires et stagiaires 62
Formations 62
Missionnaires 62
Stagiaires 63
Hygiène et sécurité 63
Relations avec les autorités 63
Révisions des plans ORSEC 63
Participation à l'exercice CARIBWAVE 63
Participation à l'exercice "NOVI - Séisme fort" 66
Vulgarisation scientifique, Conférences et médias 69
Actions de vulgarisation scientifique 69
Conférences 69
Interventions dans les médias 69
Projets de recherche 71
Projet PREST 71
WP5 : Plateforme Marine 71
WP6 : Le CUBI, un sismomètre fond de mer adapté aux Antilles 74
Publications PREST en 2023 75
Réseau temporaire de nodes 76
Déploiement d'antennes sismiques sur la Montagne Pelée 76
Déploiement de 25 stations autour de la Caldeira 80
Projet Irima 82
Références 83
Accès aux données de l'OVSM-IPGP 83

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 - facebook : ObservatoireVolcanoSismoMartinique - youtube : Chaîne IPGP

Couverture

Photo prise par David Melezan / OVSM-IPGP, le 12 avril 2023.

Citation de ce rapport

F. Beauducel, J. Corbeau, J.-C. Komorowski, J.-B. de Chabalier, C. Aubaud, G. Carazzo, A. Burtin, et l'équipe de l'OVSM-IPGP, Rapport d'activité 2023 de l'Observatoire volcanologique et sismologique de Martinique, *Institut de physique du globe de Paris*, février 2024.

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 Interministériel de Zone Antilles pour leur 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 leur 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, IsDeform, RAP), le Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche et le Ministère de la Transition Écologique et de la Cohésion des Territoires, le projet Européen PREST "Vers la Plateforme Régionale de Surveillance Tellurique du futur" (Interreg Caraïbe V), le projet Européen EUROVOLC (No. 731070), le projet Européen EPOS pour leur soutien financier.

Personnels

> à l'observatoire en Martinique

Prénom NOM	Fonction
Arnaud Andrieu	Ingénieur d'étude IPGP - Réseau temporaire de nodes sismiques (CDD)
Cyril Aubaud	Physicien-adjoint IPGP - Directeur et responsable scientifique intérimaire *(juillet à août 2023)*
François Beauducel	Physicien IPGP - Directeur et responsable scientifique intérimaire *(jan. à fév., oct. 2023 à jan. 2024)*
Guillaume Carazzo	Physicien-adjoint IPGP - Directeur et responsable scientifique intérimaire *(mars à avril 2023)*
Jean-Bernard de Chabalier	Physicien-adjoint IPGP - Directeur et responsable scientifique intérimaire *(septembre à octobre 2023)*
Jordane Corbeau	Physicienne-adjointe IPGP - Directrice scientifique adjointe
Iban Fernandez	Ingénieur d'étude IPGP – Responsable technique *(arrivée 01/03/2023)* (CDD)
Jean-Gilles Gabriel	Adjoint Technique CTM - Entretien espaces verts et sites instrumentés
Frédéric Jadelus	Technicien CNRS - Instrumentation et mesures, géochimie
Alice Jalta	Assistante Ingénieure IPGP - Gestionnaire du projet PREST *(départ 01/12/2023)* (CDD)
Jean-Christophe Komorowski	Physicien IPGP - Directeur et responsable scientifique intérimaire *(mai à juillet 2023)*
Jean-Marc Lavenaire	Technicien CNRS - Informatique, administration et réseau
David Melezan	Assistant Ingénieur IPGP - Instrumentation et mesures, Assistant de prévention

Valérie Minin	Adjointe Technique CTM - Entretien bâtiment, accueil, hébergement
Samantha Phemius	Technicienne IPGP - Gestionnaire comptable et financière
Anthony Potier	Ingénieur d'étude IPGP - Plateforme marine du projet PREST (CDD)
Cyril Vidal	Ingénieur d'étude CNRS - Responsable informatique, système-réseau, bâtiment

> à Paris (équipe de direction)

Prénom NOM	**Fonction**
Marc Chaussidon	Directeur de l'IPGP
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 les équipes des observatoires de la Guadeloupe (OVSG-IPGP) et de la Réunion (OVPF-IPGP), et sur de nombreux collègues chercheurs, ingénieurs et techniciens rattachés au SNOV pour l'analyse et l'interprétation des données acquises quotidiennement par l'observatoire. L'analyse des images satellitales (Sentinel-2, ESA-CNES et Planets) et le traitement NDVI pour le suivi des zones de végétation dégradée, qui ont été pour certaines associées au dégazage passif de CO_2 du sol est réalisé par Raphaël Grandin (IPGP, SNO IsDeform). Les analyses de gaz dissous ont été réalisée par Thierry Labasque (Université de Rennes 1), celles des isotopes du carbone par Pierre Agrinier (IPGP) et les analyses des isotopes de l'hélium par P-H Blard, Zimmermann et Bouchaib Tibari (CRPG Université de Loraine). Les localisations validées par un ou une analyste des données sismiques sont disponibles sur le site du SNOV RENASS-BCSF.

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 décru de manière significative jusqu'à l'arrêt de l'activité fumerollienne depuis 1970 et une activité sismique globalement très faible.

Depuis avril 2019, 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 volcanique) et par l'apparition de signaux sismiques de type trémor et longue période, pouvant témoigner de possibles mouvements de fluides en surpression dans le système hydromagmatique interne. Au cours de l'année 2023, l'OVSM-IPGP a détecté au moins **285 séismes d'origine volcanique**, dont **229 séismes de type volcano-tectonique (VT)**. Ces séismes sont tous de magnitude inférieure ou égale à 1,0 à l'exception du séisme du 31 janvier 2023 de magnitude 2,0. L'énergie libérée cumulée de l'ensemble de ces séismes VT en 2023 est de **76 MJ**. Pour rappel l'OVSM avait enregistré 643 séismes VT et une énergie libérée cumulée de l'ensemble de ces séismes de 28 MJ en 2022.

Une zone de végétation dégradée située sur le flanc sud-ouest de la Montagne Pelée avait été observée sur les images satellitales depuis fin décembre 2019 et confirmée visuellement depuis le mois de décembre 2020. En février 2021, les mesures de concentration du CO_2 dans l'air ambiant au-dessus de cette zone montrait une concentration maximale 10 fois supérieure à la concentration ambiante suggérant fortement la présence d'un dégazage passif de CO_2 du sol. Plusieurs autres zones de végétation dégradée ont été identifiées par la suite, sur le flanc sud et sud-ouest, et suivies visuellement et par l'analyse d'images satellitales. La zone initiale est en voie de végétalisation mais d'autres zones de végétation dégradée sont présentes suggérant

localement la persistance d'un dégazage passif de CO_2 du sol au-delà des valeurs ambiantes nominales.

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. Les analyses chimiques et isotopiques ont confirmé un dégazage de CO_2 d'origine magmatique.

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 à l'échelle de l'année, voire en légère diminution. 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 avril 2019 et de leur nature, et sur la base des observations de l'OVSM-IPGP enregistrées au cours de l'année 2023 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, à la date de rédaction de ce rapport le niveau d'alerte est : **JAUNE = Vigilance.**

Activité globale observée	**Minimale** niveau de base	**Inhabituelle / En augmentation** variations de quelques paramètres au dessus de leur niveau de base	**Fortement augmentée** variations de nombreux paramètres, sismicité fréquemment ressentie	**Maximale** sismicité volcanique intense, déformations majeures, explosions, émissions gazeuses, …
Délai prévisionnel avant une éruption	**Siècle(s) / Années**	**Année(s) / Mois / Semaines**	**Mois / Semaine(s)**	**Imminente / En cours**
Niveaux de surveillance et d'alerte	**VERT = référence**	**JAUNE = Vigilance**	**ORANGE = Pré-alerte**	**ROUGE = Alerte**

Les niveaux d'alerte sont définis par le dispositif ORSEC Préfecture et leur application relève d'une décision préfectorale.

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 complément de son bulletin mensuel détaillé et de son rapport annuel. Ces différentes informations sont reprises sur les réseaux sociaux de l'OVSM (Facebook et X/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, **1165 séismes d'origine tectonique** ont été enregistrés en 2023, parmi lesquels **8 séismes ont été ressentis** en Martinique. Le séisme le plus fortement ressenti en Martinique en 2023 (intensités macrosismiques maximales de **IV à V** d'après les témoignages internet du BCSF, magnitude 5,0) s'est produit le **1er septembre 2023** à 19h01 heure locale, à environ 49 km au nord-est de Le Vauclin et à environ 54 km de profondeur.

Instrumentation

De nombreuses interventions de contrôle préventif, de maintenance, et d'entretien ont été effectuées tout au long 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) et a fonctionné jusqu'au 30 août 2023.

Le sismomètre de fond de mer développé durant le projet PREST a été testé avec succès au large du Carbet au mois de juillet 2023. Le radôme de protection du hub satellitaire VSAT et ses antennes situés au pied de l'Observatoire du Morne des Cadets ont été démontés et transférés dans l'enceinte du nouvel observatoire de Morne La Rosette début avril 2023.

Personnel

Iban Fernandez, ingénieur en instrumentation IPGP, a pris ses fonctions le 1er mars 2023 en tant que responsable technique de l'observatoire.

Alice Jalta, assistance-ingénieure IPGP, a terminé son contrat de gestionnaire du projet PREST le 1er décembre 2023.

L'année 2023 a été marquée par l'intérim de direction scientifique assuré par cinq chercheurs CNAP (Corps National des Astronomes et Physiciens) qui se sont relayés en coordination en fonction des contraintes de calendrier de chacun, essentiellement liées aux charges d'enseignement statutaires à l'Université Paris Cité :

François Beauducel, Physicien à l'IPGP, de janvier à février 2023, puis de fin octobre 2023 à janvier 2024.

Guillaume Carazzo, Physicien-Adjoint à l'IPGP, mars à début avril 2023.

Jean-Christophe Komorowski, Physicien-Adjoint à l'IPGP, de mi-mai à mi-juillet 2023.

Cyril Aubaud, Physicien-Adjoint à l'IPGP, de mi-juillet à fin août 2023.

Jean-Bernard de Chabalier, Physicien-Adjoint à l'IPGP, de début septembre à début octobre 2023.

Divers

Une journée de conférences scientifiques a été organisée à Saint-Pierre par l'OVSM-IPGP et la mairie de Saint-Pierre, le 30 juin 2023 au Centre de Découverte des Sciences de la Terre, sur le thème *« Saint-Pierre : mieux vivre à l'ombre de la Montagne Pelée »*.

Les clés du bâtiment de l'Observatoire du Morne des Cadets ont été remises à la CTM le 16 juin 2023, marquant la fin définitive de l'occupation de ce bâtiment par le personnel de l'OVSM-IPGP. Par ailleurs, suite à un désordre dans la structure métallique du nouveau bâtiment nécessitant des réparations, l'équipe a temporairement délocalisé ses bureaux dans les studios adjacents du 24 juillet 2023 au 22 décembre 2023.

Introduction

Dès 1902, Alfred Lacroix, Professeur au Muséum d'Histoire Naturelle, fit établir un observatoire volcanologique sur un piton rocheux dans la zone 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 et se nomme alors *Observatoire du Morne des Cadets* ou encore *Observatoire Volcanologique de la Montagne Pelée* (OVMP). En 2006, le nom actuel *Observatoire Volcanologique et Sismologique de la Martinique* (OVSM) est adopté.

La collectivité unique de Martinique, la *Collectivité Territoriale de Martinique* (CTM) est créée le 1er janvier 2016. Un nouveau bâtiment, situé sur le Morne Rosette à Saint-Pierre, est inauguré en décembre 2019 et une convention de mise à disposition pour le personnel de l'OVSM-IPGP a été signée en décembre 2020 entre la CTM et l'IPGP.

Les missions qui sont confiées à l'IPGP et à l'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;
- 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 – CENAIS à Cuba ; Bureau de Recherche Géologique et Minière – BRGM, Institut de Recherche pour le Développement -IRD, etc. ;
- Participation dans le Comité d'experts en volcanologie (CEV) de l'IPGP
- 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 (Grand établissement d'enseignement supérieur et de recherche et établissement composante d'Université Paris Cité), sous tutelle du Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche MESR et ayant des conventions avec le Ministère de l'écologie et de la Cohésion des Territoires MECT) ;
- l'Institut National des Sciences de l'Univers (INSU) du CNRS ;
- la Collectivité Territoriale de Martinique avec laquelle l'IPGP est lié depuis 2021 par une convention, qui prends la suite de la convention de 1985 avec le Département de Martinique ;
- des projets nationaux, européens et internationaux déposés par les chercheurs de l'OVSM et de 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 la station de mesure et les antennes de radiocommunication de l'observatoire installées sur le site TDF du Morne Bigot ;
- 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 produisant des écoulements pyroclastiques (« 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 dont 13 éruptions explosives (pliniennes) avec retombées de cendres et de ponces et des écoulements pyroclastiques ; et 21 éruptions dites péléennes à croissance de dômes qui génèrent des écoulements pyroclastiques par effondrement gravitaire ou explosion latérale dirigée de dômes (Michaud-Dubuy et al., 2021). Plusieurs de ces éruptions 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 qui a été détruit par plusieurs explosions latérales dirigées dévastatrices et qui a produit des écoulements pyroclastiques denses et turbulents connus sous le nom de « nuées ardentes ». Une soixantaine de nuées ardentes se produisirent pendant cette période dont plusieurs comme celle du 8 mai 1902 qui détruisit la ville de Saint-Pierre (20 mai, 26 mai, 6 juin, 9 juillet), et celle du 30 août 1902 qui ravagea le Morne Rouge, se sont propagées sur une vaste zone sans être chenalisées par la topographie. Cette éruption magmatique causa environ 29 000 victimes. L'une des explosions aura été 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'effondrements gravitaire du dôme qui ont été chenalisés dans la rivière Blanche et la rivière Claire.

Depuis 1932, l'activité a décru 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 essaims de séismes en 1980, 1985-1986, 2006, et 2013-2014.

Depuis avril 2019, 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, de type volcano-tectonique (VT, hautes fréquences), quelques rares séismes profonds entre 10 et 20 km sous l'édifice volcanique, et l'apparition de signaux sismiques de type longue période (LP, basses fréquences), arrivant parfois sous forme d'essaim et pouvant alors être assimilés à des événements de type trémor (relâchement soutenu d'énergie sismique généralement associé à des mouvements de fluides). Plusieurs observations phénoménologiques reflètent également une réactivation du système volcanique. Une synthèse de l'activité de la Montagne Pelée est présentée à la page de ce rapport.

Activité sismique

Depuis l'installation des premiers réseaux sismologiques permanents dans les années 1960, la sismicité liée à l'activité du volcan de la Montagne Pelée est généralement superficielle et de faible énergie. Une crise sismique de 55 événements en 6 jours entre octobre et novembre 1980 a été enregistrée par l'observatoire (Boudon et al., 2005). De décembre 1985 à juin 1986, une seconde crise sismique avec des séismes de type volcano-tectonique, aussi appelé VT (événements caractérisés par un signal contenant des hautes fréquences jusqu'à plus de 15 Hz, et qui sont associés à des processus de micro-fracturation ou d'activation de fractures existantes dans l'édifice volcanique) a été détectée en provenance d'une source peu profonde sous la Montagne Pelée (Hirn et al., 1987). La **Figure 1** montre un exemple de VT observés à la station sismique LAM située au sommet du volcan en 1985-86. La détection de ces séismes fut possible grâce au déploiement de sismomètres sur le volcan, mais les auteurs suggèrent déjà la présence de séismes similaires dans les sismogrammes de 1976.

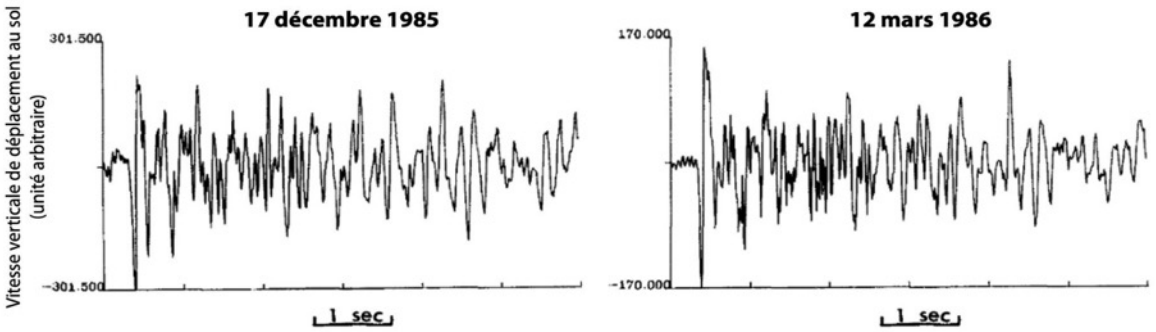


Figure 1. Sismogrammes de deux séismes de type VT-1 enregistrés le 17 décembre 1985 et le 12 mars 1986 à la station sismique LAM située au Morne La Croix au niveau de la Montagne Pelée. D'après Hirn et al. (1987).

Les séismes VT enregistrés depuis 1976 sont observés encore aujourd'hui avec le réseau sismique de l'OVSM-IPGP. Ceux-ci forment un type de séisme volcano-tectonique appelé VT de type 1 (noté VT-1) dans la suite de ce rapport. Une observation remarquable est la similarité des enregistrements réalisés en 1985-86 (**Figure 1**) et ceux détectés depuis 2013 avec les instruments modernes (voir un exemple en 2023 à la **Figure 2**). Cette similarité permet de définir ce type de séisme comme un « répéteur », c'est-à-dire une structure interne unique de type faille ou fracture s'activant suite aux variations de contraintes dans l'édifice volcanique. Les répéteurs sismiques ont l'avantage d'être parfaitement localisables et détectables par des processus de reconnaissance automatique.

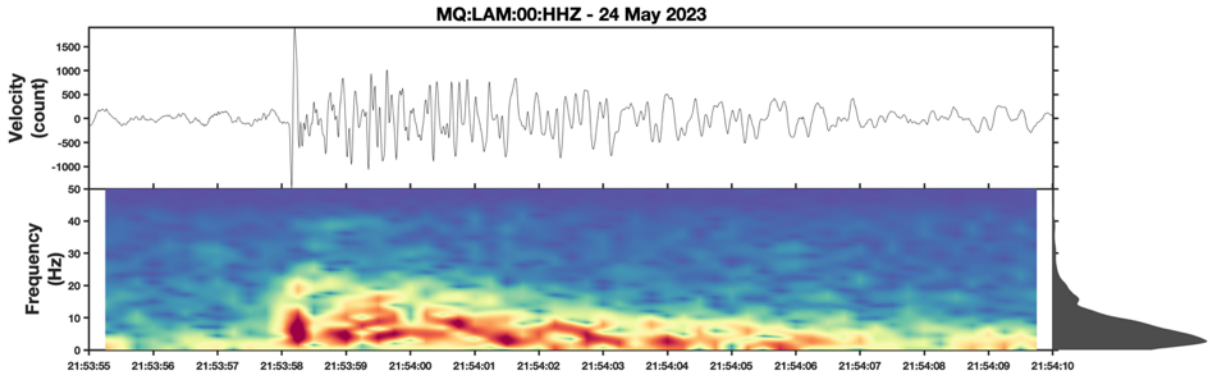


Figure 2. Exemple de séisme de type VT-1 enregistré le 24 mai 2023 à 21h53 (TU) par la station large bande LAM installée près du sommet de la Montagne Pelée depuis 2005. Le signal a été filtré de ses composantes basses fréquences (au-dessous de 1 Hz) liées à des processus non volcaniques (par exemple la houle océanique). (Haut) Vitesse de déplacement du sol (en unité numérique) dans la direction verticale. (Bas) Évolution du contenu fréquentiel en fonction du temps (spectrogramme) et à droite le spectre d'énergie de l'ensemble du signal.

Sismicité depuis 1995

La sismicité enregistrée par les réseaux de surveillance entre le 1er janvier 1995 et le 31 décembre 2023 est généralement faible, avec une valeur médiane de 47 séismes par an. La **Figure 3** représente le nombre de séismes de type VT détectés par année, en valeurs annuelles calendaires (du 1er janvier au 31 décembre de chaque année) et en valeur glissante sur 365 jours révolus, méthode qui donne des valeurs souvent supérieures avec un maximum apparaissant dans le courant de l'année. Il faut signaler que le système de détection n'est pas uniforme sur toute la période : avant 2013, il ne s'agit que d'un comptage manuel (l'événement doit être suffisamment fort en amplitude pour être visible sur les sismogrammes et identifié par un opérateur), tandis qu'à partir de 2013 la détection manuelle est complétée par un outil d'identification automatique très robuste et beaucoup plus sensible. Le nombre de séismes avant 2013 est donc potentiellement sous-estimé (zone grisée sur la figure) et un travail est en cours pour retraiter les anciens enregistrements numériques et homogénéiser toute la série temporelle de données.

Sur base de ces données encore non consolidées, on constate que jusqu'en 2010 la sismicité volcanique est très faible, avec de tous petits essaims — nom donné à une succession de nombreux séismes rapprochés dans le temps — observés en 2000 (maximum 37 séismes/an), 2003 (maximum 37 séismes/an) et 2006 (maximum 107 séismes/an). C'est à partir de 2011 qu'une activité significative apparaît avec une augmentation quasi continue jusqu'à un pic en 2014 atteint le **30 septembre 2014** avec **2381 séismes par an**. Après ces essaims, l'activité redescend à un niveau plus faible entre 2015 et 2018, avec cependant un

petit essaim significatif en 2018 (601 séismes/an). La réactivation sismique débute en 2019 avec une augmentation continue jusqu'à atteindre un maximum en 2021 (2877 séismes sur l'année calendaire et un maximum de **3232 séismes par an le 29 novembre 2021**, dépassant de 36 % le pic de 2014), puis une redescente en 2022 (643 séismes sur l'année calendaire) et 2023 (229 séismes sur l'année calendaire).

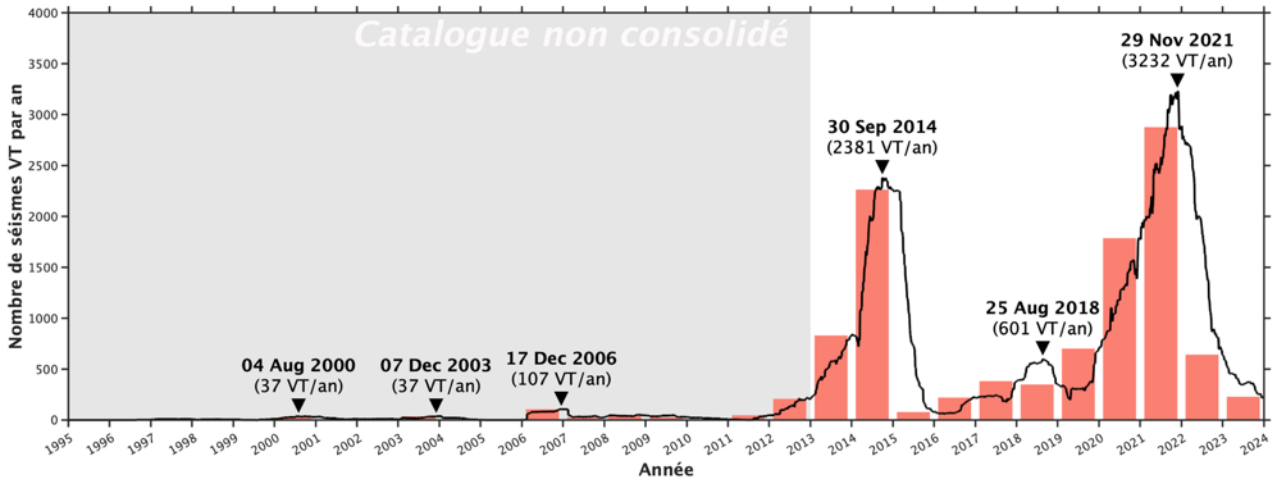


Figure 3. Évolution du nombre annuel de séismes de type volcano-tectoniques (VT) enregistrés à l'OVSM-IPGP du 1er janvier 1995 au 31 décembre 2023 (données WebObs/OVSM). En rouge le nombre de séismes comptabilisé sur chaque année calendaire (du 1er janvier au 31 décembre), en noir le nombre glissant compté sur 365 jours révolus, avec les maximums atteints (date et taux). Les années sont indiquées au 1er janvier. La zone grisée indique les données encore non consolidées car ne prenant pas en compte les détections automatiques.

Lors des rapports précédents, il a été mentionné l'hypothèse selon laquelle l'activité sismique observée à partir du 3 mars 2014 aurait été causée ou déclenchée par un fort séisme tectonique régional (magnitude 6,5 localisé à 210 km à l'est de la Martinique), survenu le 18 février 2014, soit 13 jours auparavant. Cette hypothèse est remise en cause avec le catalogue consolidé qui montre clairement que l'essaim sismique d'origine volcanique avait débuté près de 2 ans auparavant avec un taux de sismicité en augmentation constante toute l'année 2013 et jusqu'à l'occurrence de cet événement régional. D'autre part, les calculs mécaniques suggèrent que le séisme, malgré sa forte magnitude, était beaucoup trop éloigné de l'édifice volcanique pour perturber directement son système par déformation dite statique. La relation de causalité n'est donc pas prouvée et l'essaim sismique de 2012-2014 doit être pris en compte dans le bilan et l'historique d'activité sismique d'origine volcanique de la Montagne Pelée. Enfin, il est assez remarquable de constater que les courbes du taux annuel de sismicité pour l'essaim de 2012-2014 d'une part et 2017-2023 d'autre part sont relativement homothétiques (de forme géométrique similaire), avec une augmentation progressive d'allure exponentielle puis une diminution plus rapide d'allure asymptotique. Ceci suggère que les deux essaims seraient liés à un processus de nature similaire, bien que le plus récent soit plus important à tous points du vue (nombre d'événements, taux et durée).

Niveau de base de la sismicité VT

La **Figure 4** montre l'évolution temporelle du taux mensuel de sismicité par mois lunaire (intervalle de 28 jours révolus) entre le 1er janvier 2013 et le 31 décembre 2023. Après l'essaim de 2012-2014 qui a atteint un maximum de 520 séismes par mois en avril 2014, on observe plusieurs pics de sismicité modérée entre 2016 et 2018 avec un maximum en décembre 2017 (160 séismes). C'est à partir d'avril 2019 que les pics de sismicité se produisent à intervalles plus réguliers et avec une augmentation constante des maxima jusqu'à atteindre un paroxysme en avril-mai 2021 (605 séismes) et un autre maximum secondaire marqué en septembre 2021 (505 séismes). Après cette date la sismicité semble diminuer de façon asymptotique. On peut remarquer sur la **Figure 4** une périodicité des pics de sismicité, en moyenne de 5 mois depuis 2019.

Afin d'établir une référence du taux de sismicité en période « calme », l'OVSM a choisi un intervalle de temps relativement long entre les deux principales périodes d'essaims de 2012-2014 et 2019-2023 : entre le 1er janvier 2015 et le 1er avril 2019 (1551 jours, soit environ 4 ans et 3 mois). Durant cette période de temps (zone vert clair sur la **Figure 4**), le nombre total de séismes VT détectés est de 1067 séismes, soit un taux moyen de **251 séismes par an**, **19,3 séismes par mois** (de 28 jours) ou encore **4,8 séismes par semaine**. Ces valeurs sont des indicateurs permettant de situer l'activité en cours sur les différentes périodes d'intégration des données, qui doivent être mise en rapport avec les phénomènes physiques à l'origine de ces observations.

Ainsi, comme il est rappelé dans les bilans hebdomadaires et bulletins mensuels, la sismicité volcanique est généralement fluctuante et il est fréquent d'observer un taux de sismicité par semaine ou par mois repasser momentanément au-dessous du seuil de référence, surtout durant la période de diminution de l'activité que nous observons depuis 2022.

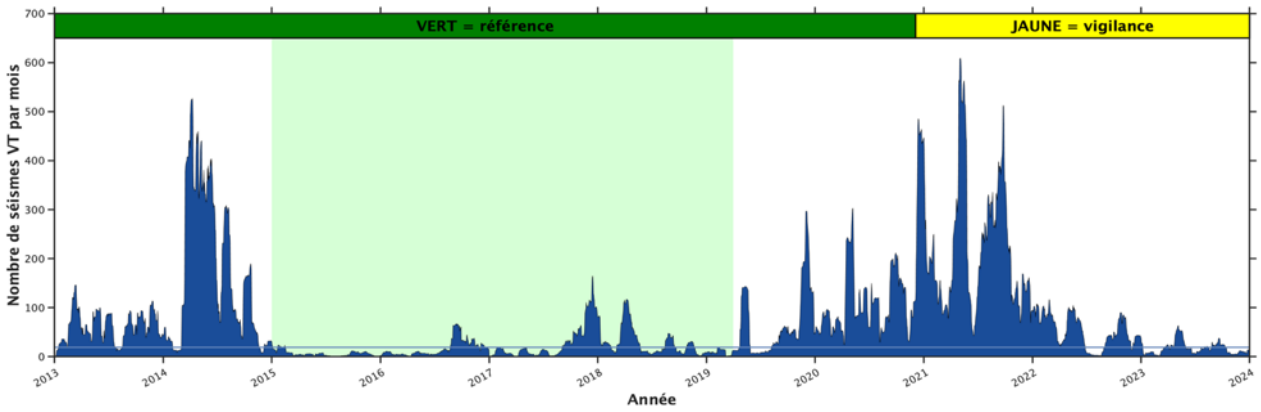


Figure 4. Nombre de séismes volcano-tectoniques par mois (période de 28 jours révolus, en bleu) du 1er janvier 2013 au 31 décembre 2023 (données WebObs/OVSM). La zone en vert clair indique la période de référence choisie pour définir le niveau de base (janvier 2015 à avril 2019), soit 19,3 séismes par mois (ligne bleue horizontale). Les périodes de niveaux d'activité et d'alerte (vert = référence et jaune = vigilance) sont également indiquées.

Activité sismique de l'année 2023

Au cours de l'année 2023, l'OVSM-IPGP a détecté au moins **285 séismes d'origine volcanique**, dont **233 séismes de type volcano-tectonique** (VT). Ces séismes, de magnitude inférieure ou égale à 2 n'ont pas été ressentis par la population.

La **Figure 5** montre l'évolution du nombre de séismes VT entre le 1er janvier et le 31 décembre 2023, en indiquant le taux journalier, hebdomadaire et mensuel. Sont indiqués les jours de la publication du bilan hebdomadaire dans lequel ces statistiques sont annoncées. Certains de ces événements ne sont pas localisables étant donné leur faible amplitude. Parmi ces 233 séismes de type VT, **88 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.

L'année 2023 a été marquée par l'occurrence de l'un des plus forts séismes depuis le début de la réactivation. L'événement a été enregistré le 31 janvier 2023 à 20:02 TU (**Figure 7**). Il a été localisé sous le sommet de la Montagne Pelée à environ 300 m au-dessus du niveau de la mer. Sa magnitude a été estimée à environ 2,0 (entre 1,5 et 2,3 selon les méthodes de calcul utilisées). Ceci le démarque nettement des autres séismes de l'année qui sont tous de magnitude $M_d < 0,8$.

En 2023, l'OVSM-IPGP a enregistré 5 signaux sismiques de type hybride (2 superficiels et 3 profonds), 47 de type longue période (LP) et aucun de type trémor. Parmi les 47 LP, 7 séismes sont profonds (dont 5 ont été localisés) et 2 sont de trop faible amplitude pour être caractérisés. Un exemple de signal LP profond est donné à la **Figure 8**. Les autres LP ont été enregistrés sous forme d'un essaim de 38 séismes survenu le 20 février 2023 entre 00h et 05h TU. Ces événements de faible énergie ont été détectés a posteriori par un traitement automatique qui les identifie comme provenant d'une source unique (répéteur voir **Figure 9**). Ils sont difficilement localisables mais les rapports d'amplitude entre les 3 composantes suggèrent qu'il s'agit d'une source superficielle et située dans la zone d'une carrière d'exploitation. Une origine anthropique de ces signaux n'est donc pas exclue et un travail d'approfondissement doit être mené pour les cataloguer définitivement.

Les 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 2023. Les chiffres peuvent varier légèrement de ceux publiés dans les bulletins mensuels du fait de la consolidation des données.

Le calcul de l'énergie sismique libérée est délicat car il dépend du type de séisme et reste difficile à évaluer pour les LP et hybrides. La **Figure 12** représente l'évolution temporelle de l'énergie cumulée depuis 2019. On y voit clairement les marches d'activité de 2020 puis 2021, et depuis 2022 une nette diminution de l'occurrence d'essaims énergétiques, hormis l'événement du 31 janvier 2023.

Notons que plusieurs familles de séismes de type VT ont été observées depuis le début de la réactivation, principalement à proximité de la falaise Samperre et dans la zone du système hydrothermal de la Montagne Pelée (**Figure 10** et **Tableau 2**). Durant l'année 2023, en plus de la famille VT1 largement majoritaire, seules les familles 5, 6 et 7 ont été détectées. Un exemple de signal de type VT-5 est donné à la **Figure 11**.

L'activité sismique actuelle est essentiellement associée à l'activité du système hydrothermal : interaction entre l'eau, les roches et une source de chaleur au sein de la Montagne Pelée. L'activité sismique à plus de 10 km sous le sommet de la Montagne Pelée, témoin des sources magmatiques profondes, reste faible et limitée à quelques événements isolés.

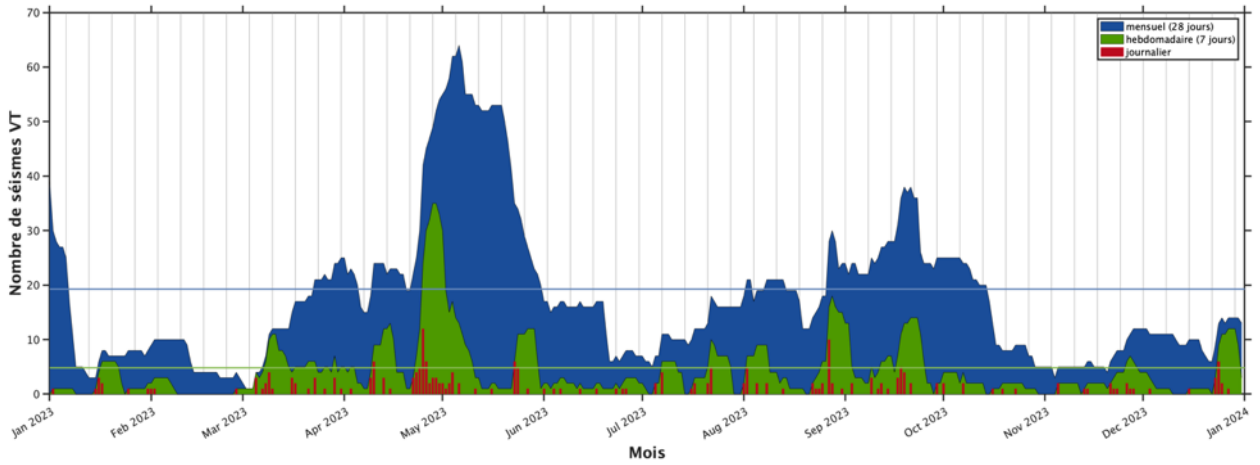


Figure 5. Séismes de type volcano-tectonique détectés du 1er janvier 2023 au 31 décembre 2023 en nombre journalier (rouge), hebdomadaire (vert) et mensuel (bleu) (données WebObs/OVSM). Le nombre de séismes hebdomadaires est compté de façon glissante sur 7 jours révolus, le nombre de séismes mensuels est compté sur 28 jours révolus. Les deux lignes horizontales indiquent le niveau de base moyen pour le taux de sismicité mensuelle (19 séismes par mois, en bleu) et hebdomadaire (5 séismes par semaine, en vert). Les lignes verticales grisées indiquent les jours de publication des bilans hebdomadaires.

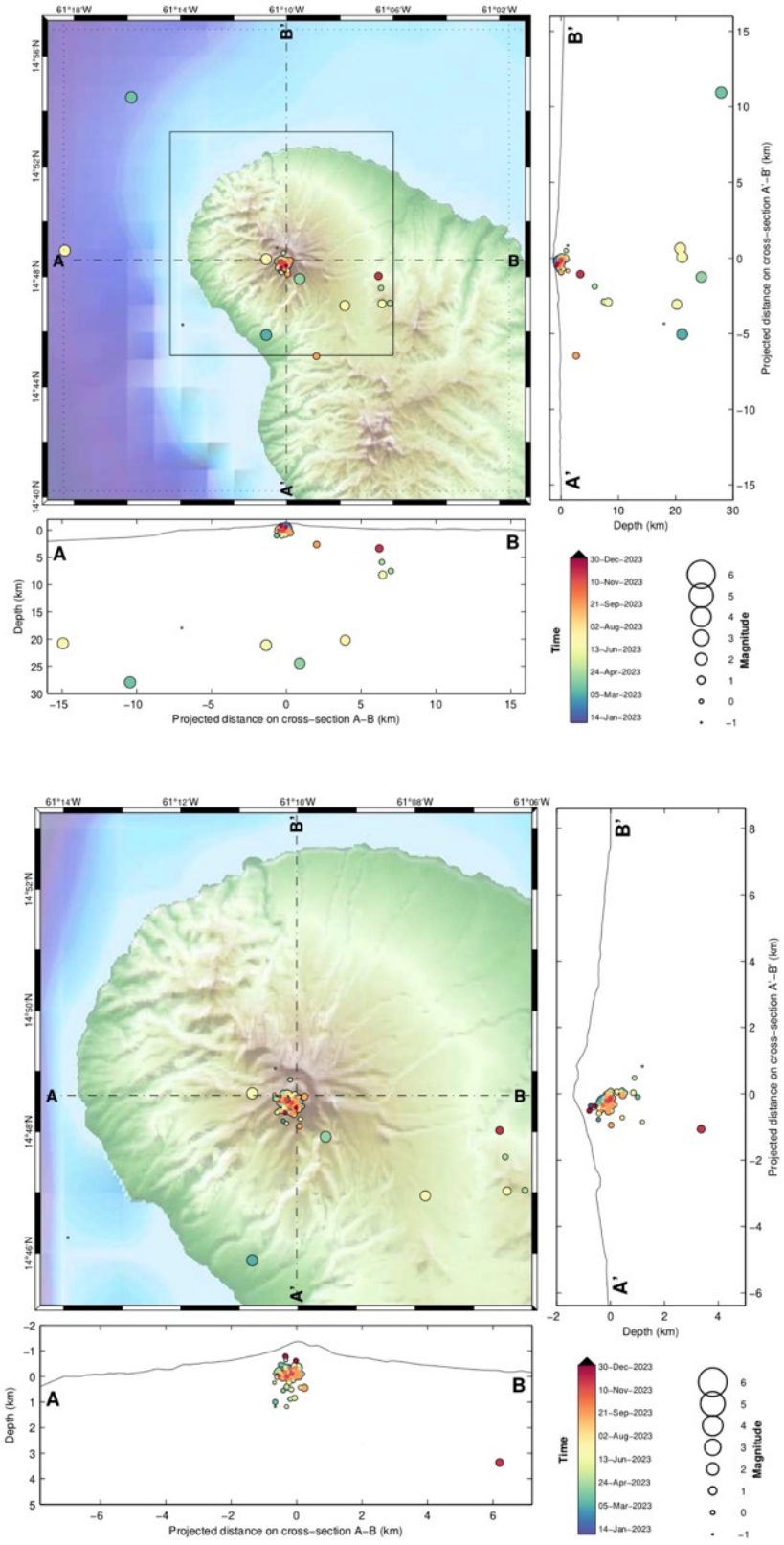


Figure 6. (Haut) Carte de localisation de la sismicité volcanique (VT, VT distaux, LP, hybride, hybride profond) enregistrée sous et autour de la Montagne Pelée en 2023, et coupes nord-sud et est-ouest indiquant la localisation des hypocentres en profondeur. (Bas) Zoom sur la Montagne Pelée et la majeure partie de la sismicité qui est située à moins de 2 km de profondeur sous la surface. La taille des événements correspond à la magnitude, et la couleur indique la date (source WebObs/OVSM).

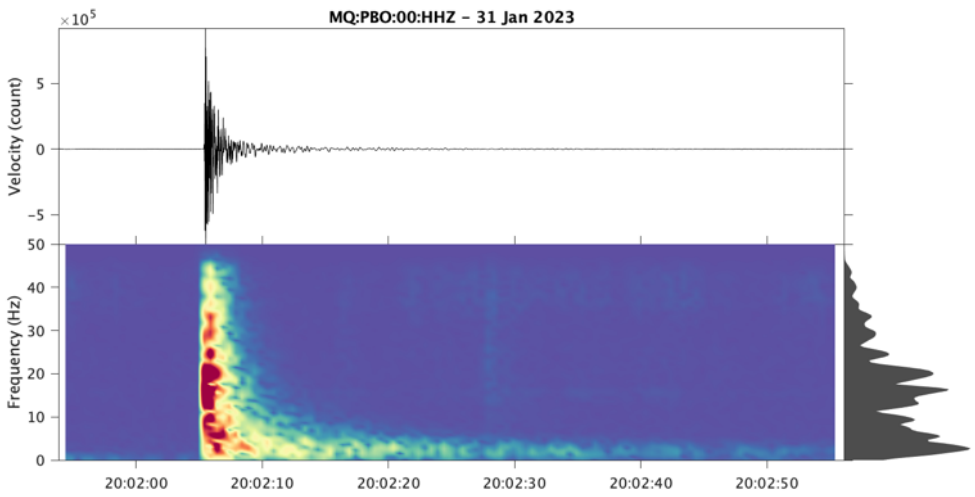


Figure 7. Séisme de type volcano-tectonique du 31 janvier 2023 à 20:02 TU enregistré à la station PBO sur la composante verticale : signal temporel (haut), spectrogramme et spectre d'énergie (bas) (données WebObs/OVSM).

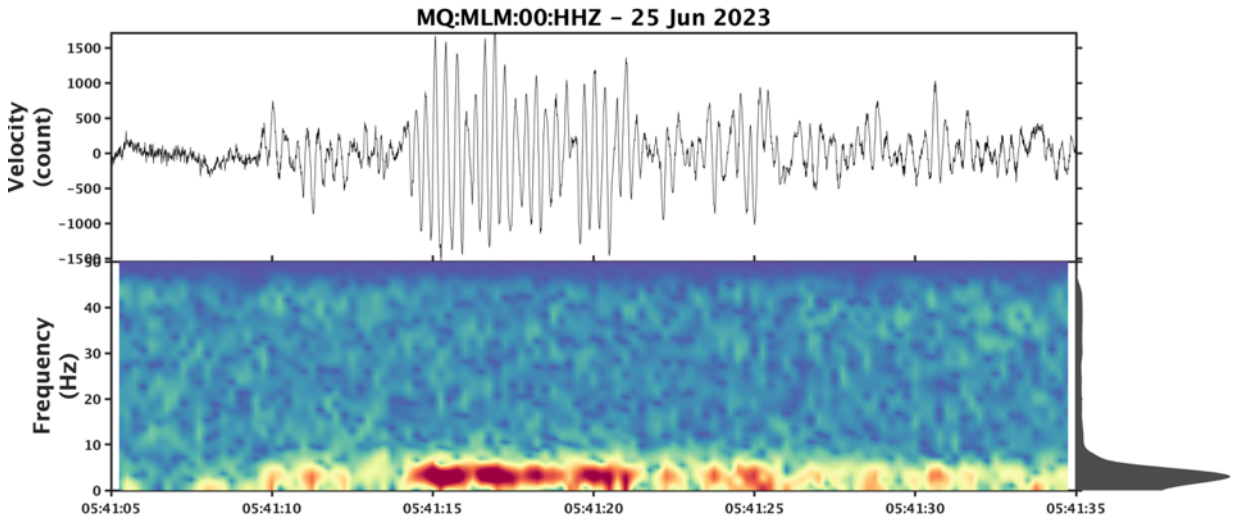


Figure 8. Séisme volcanique longue-période profond du 25 juin 2023 à 05:41 TU à la station MLM sur la composante verticale : signal temporel (haut), spectrogramme et spectre d'énergie (bas) (données WebObs/OVSM).

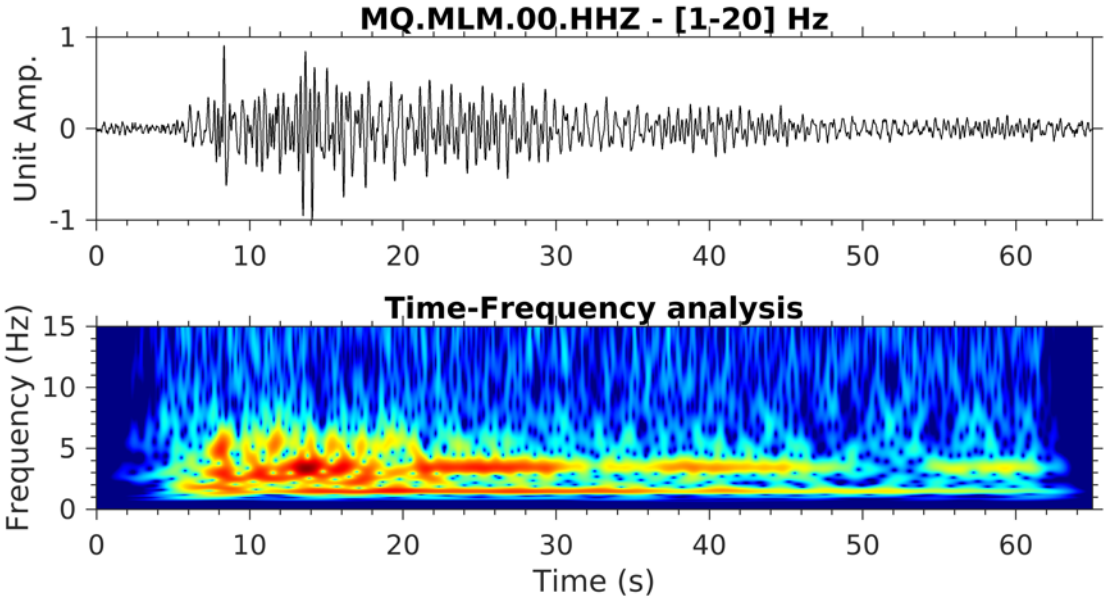


Figure 9. Répéteur sismique longue-période détecté en essaim les 19 et 20 février 2023. (Haut) Forme d'onde sismique sommée pour les 38 événements détectés à la station MLM. (Bas) Analyse temps-fréquence du répéteur sismique enregistré à MLM montrant une énergie sismique essentiellement à basse-fréquence entre 1 et 3 Hz.

Nombre de séismes	Janvier 2023	Février 2023	Mars 2023	Avril 2023	Mai 2023	Juin 2023
Volcano-tectonique	9	5	25	58	25	8
Longue période	1	38(*)	1	1	0	2
Hybride (profond et superficiel)	0	0	1	2	0	0
Trémor	0	0	0	0	0	0

Nombre de séismes	Juillet 2023	Août 2023	Septembre 2023	Octobre 2023	Novembre 2023	Décembre 2023
Volcano-tectonique	16	31	25	7	12	14
Longue période	4	0	0	0	0	0
Hybride + hybride profond	1	0	1	0	0	0
Trémor	0	0	0	0	0	0

Tableau 1. Statistique des types de signaux sismiques détectés en 2023 par l'OVSM-IPGP. Les chiffres peuvent varier légèrement de ceux publiés dans les bilans hebdomadaires et bulletins mensuels du fait de la consolidation des données. (*)Séquence de LP dont l'origine volcanique doit encore être confirmée.

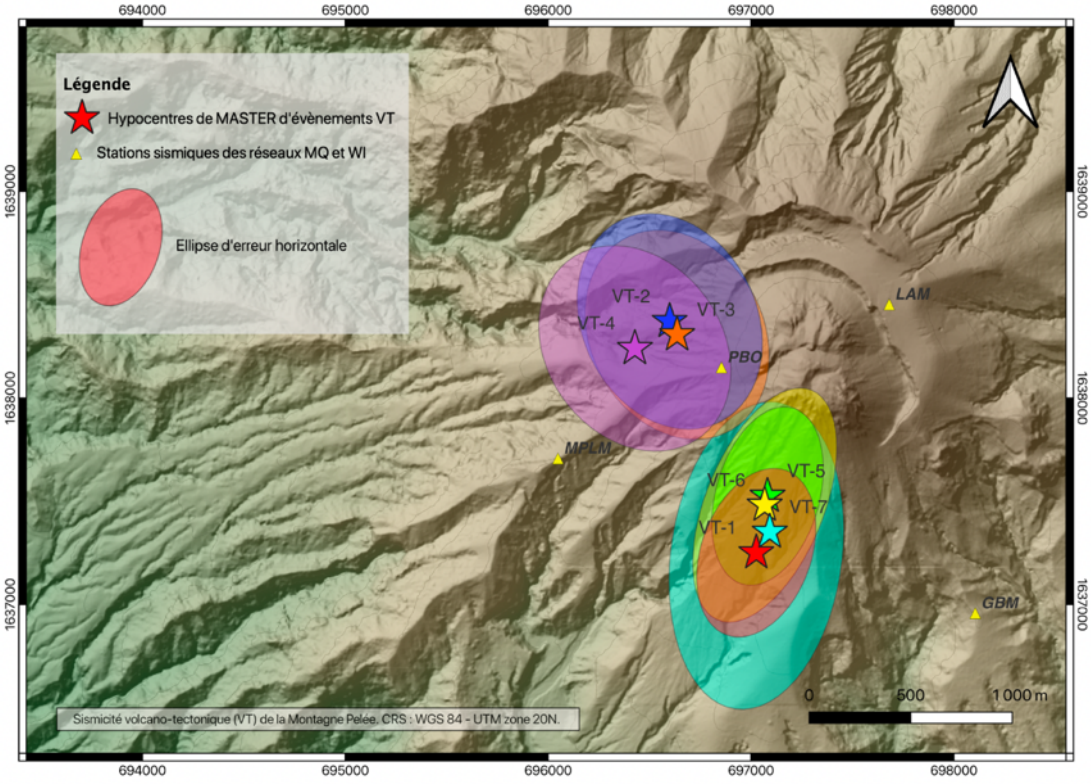


Figure 10. Carte de localisation des séismes VT de type VT-1 à VT-7 (rapport de stage M1 de S. Zhou-Wahlgren, 2021) et détaillés dans le **Tableau 2**.

Nom	Date des premières observations	Profondeur par rapport à la surface	Localisation
VT-1	séismes récurrents depuis au moins les années 70	-0,38 km (relocalisation)	zone du système hydrothermal, amont de la rivière Chaude
VT-2	19 avril 2021	1,49 km (relocalisation)	à proximité de la falaise Samperre
VT-3	25 avril 2021	1,38 km (relocalisation)	à proximité de la falaise Samperre
VT-4	26 avril 2021	1,17 km (relocalisation)	à proximité de la falaise Samperre
VT-5	24 juin 2021 mais un séisme aussi le 13 mars 2014	-0,45 km (relocalisation)	zone du système hydrothermal
VT-6	1er juillet 2021 mais un séisme aussi le 11 mars 2014	-0,44 km (relocalisation)	zone du système hydrothermal
VT-7	26 novembre 2021	-0,42 km (relocalisation)	zone du système hydrothermal
VT-8	27 et 28 novembre 2021	3 à 9 km (localisation manuelle)	à proximité d'Ajoupa-Bouillon
VT-9	5 décembre 2021	6 à 8 km (localisation manuelle)	à proximité de Grand'Rivière

Tableau 2. Chronologie de l'apparition des différentes familles de séismes de type VT et comparaison des profondeurs. Les profondeurs des familles VT-1 à VT-7 sont issues de la relocalisation d'évènements « maîtres » obtenus à partir de la superposition des formes d'ondes (rapport de stage M1 de S. Zhou-Wahlgren, 2021). La gamme de profondeurs pour les VT-8 et VT-9 sont issues du catalogue de localisations manuelles. Les profondeurs sont données par rapport au niveau de la mer.

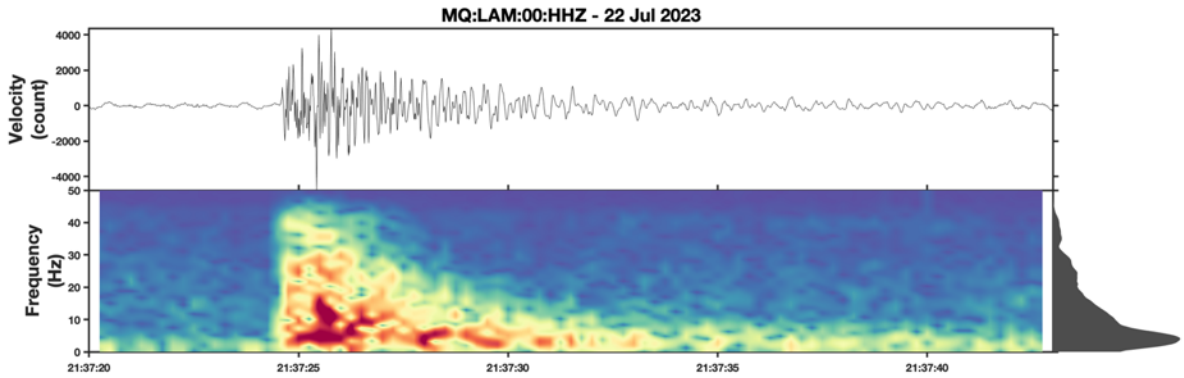


Figure 11. Exemple de séisme volcano-tectonique de type VT-5 enregistré le 22 juillet 2023 à 21:37 TU à la station LAM sur la composante verticale : signal temporel (haut), spectrogramme (bas) et spectre d'énergie (données WebObs/OVSM).

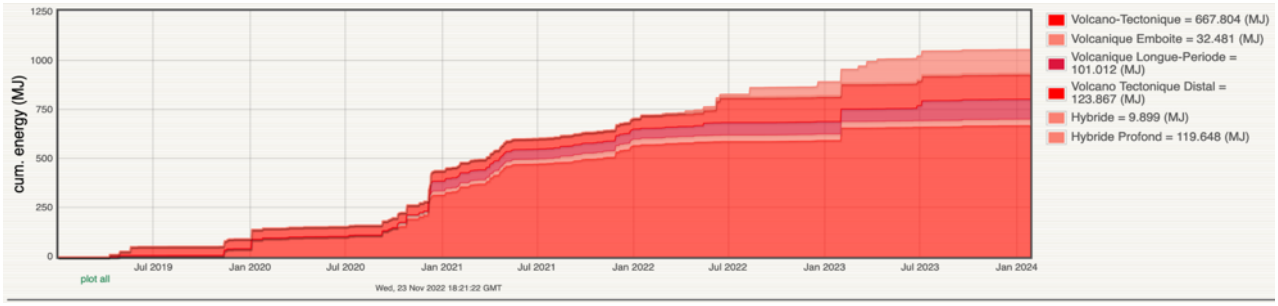


Figure 12. Énergie sismique cumulée des événements localisés depuis 2019 avec répartition des types de séisme (de bas en haut) : VT, volcaniques emboités, LP, tectoniques distaux, hybrides et hybrides profonds.

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 directions globalement radiales au volcan et centrifuges, restent faibles mais traduisent une inflation ou extension significative de l'édifice (**Figure 13**).

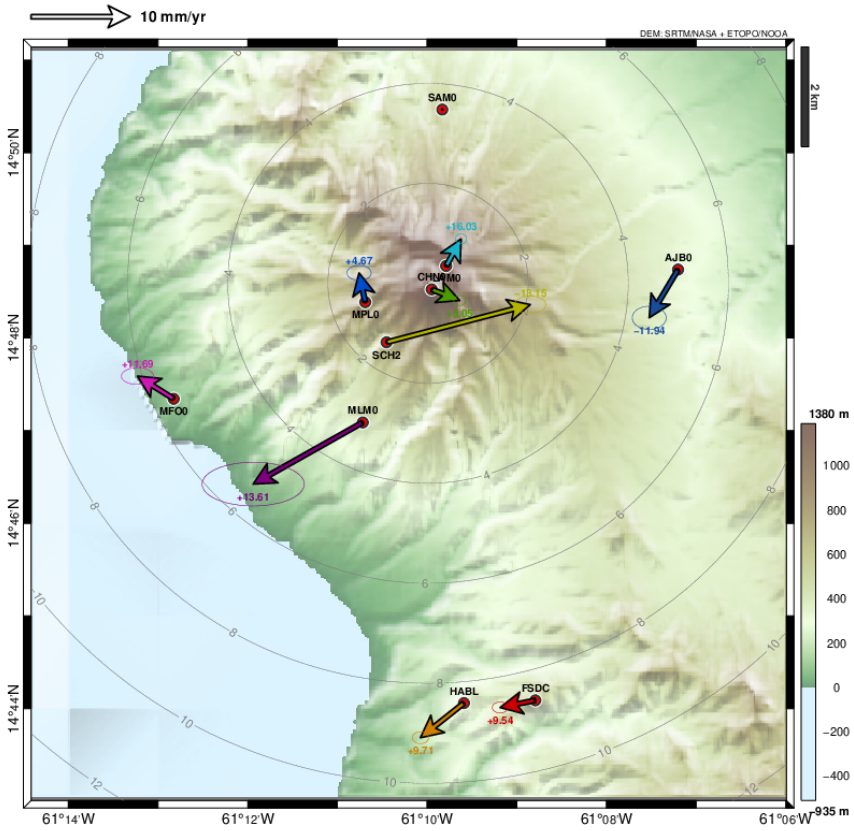


Figure 13. Vecteurs des vitesses moyennes de déformations horizontales mesurées entre le 1er janvier et le 31 décembre 2023 sur la Montagne Pelée (échelle donnée en haut à gauche en mm/an). Chaque vecteur est associé à une ellipse d'erreur ainsi qu'une indication de la vitesse verticale (globalement non significative). Les cercles concentriques gris indiquent les distances en km depuis le sommet. Le référentiel des vecteurs est virtuel (graphe WebObs/OVSM).

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 14** : 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 importante, avec un allongement total de +17 mm sur une ligne de 550 m, soit une déformation en extension de +3,1 10^{-5} (soit +0,0031%).

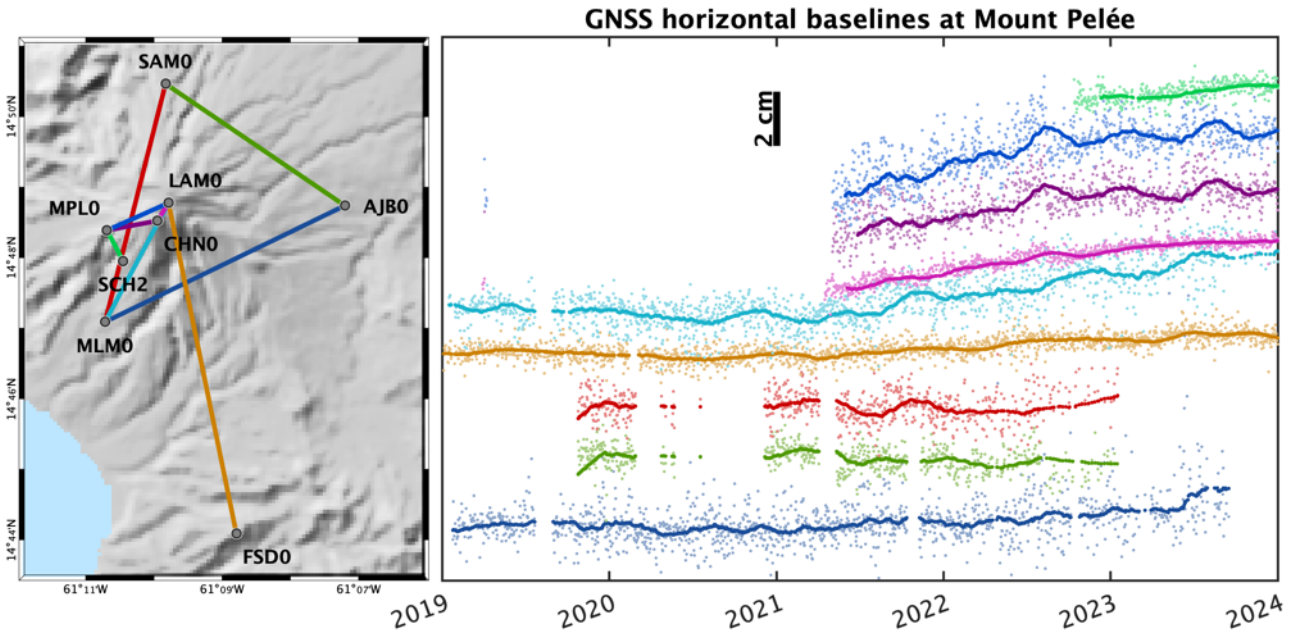


Figure 14. Variation des distances horizontales (lignes de base) sur la Montagne Pelée, calculées à partir des données journalières du réseau GNSS permanent. (Gauche) Position des lignes de base entre chaque couple de station (FSD0 correspond à la station située à l'ancien observatoire du Morne des Cadets). (Droite) Évolution des distances horizontales pour chaque couple de station sur 4 années (2019-2023) : 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, données WebObs/OVSM).

Depuis 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 Chabalier). Les déformations mesurées par les stations GNSS permanentes (acquisition et calcul journalier) montrant une déformation significative de la partie sommitale de la Montagne Pelée, des campagnes de mesures du réseau de répétition sont réalisées pour renforcer ces observations et évaluer les déformations plus distales du sommet, plus sensibles aux processus volcaniques profonds (activité magmatique).

En 2023, une campagne de répétition a été réalisée entre septembre et octobre et a bénéficié du soutien du parc national de stations GNSS de l'INSU-CNRS (10 équipements empruntés). Cette dernière campagne de 2023 permet de décrire très précisément le champ de déformation actuel de la Montagne Pelée (voir **Figure 15**). On constate une déformation significative des points du sommet de la Montagne Pelée (2 à 12 mm/an) correspondant à une inflation radiale. Sur le flanc ouest, jusqu'à la mer, on mesure aussi une déformation moins importante mais visible, de 6 à 8 mm/an, correspondant à la zone principale de glissement des dernières éruptions. En revanche, les zones sud et sont particulièrement stable, même jusqu'aux points proches du sommet (MA10).

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.

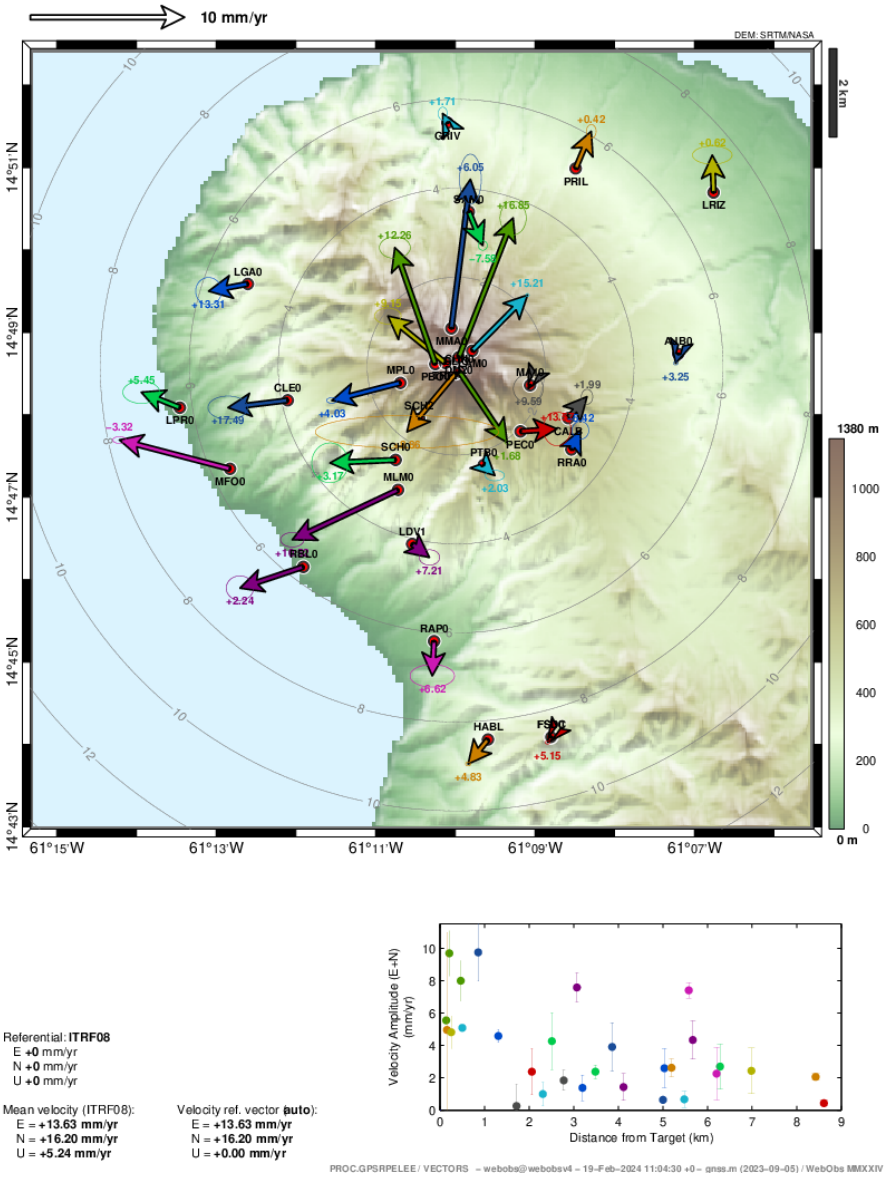


Figure 15. Champs de vecteurs vitesses des stations GNSS permanents et de répétition sur les 3 dernières années (du 1er janvier 2021 au 31 décembre 2023), obtenues à partir de solutions journalières réalisées avec GipsyX/JPL. Le graphe en bas à droite représente les amplitudes de vitesses horizontales en fonction de la distance au sommet (source JB de Chabalier WebObs/OVSM).

Ces signaux de déformation 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 16** montre le résultat de l'inversion réalisée par la méthode pCDM sous l'environnement WebObs (Beauducel et al., 2020ab) : 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 +180.000 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. Cette source pourrait être engendrée par la remontée de volumes limités de fluides hydrothermaux et/ou magmatiques (gaz, eaux hydrothermales) dans l'édifice volcanique. On remarque également sur la figure une zone de probabilité de source plus profonde, vers 3 km sous le niveau de mer et s'étendant jusqu'à 10 km. Ceci pourrait signifier que la déformation observée ces 3 dernières années, dominée par la source superficielle, comporte une légère composante liée à une source plus profonde mais peu active.

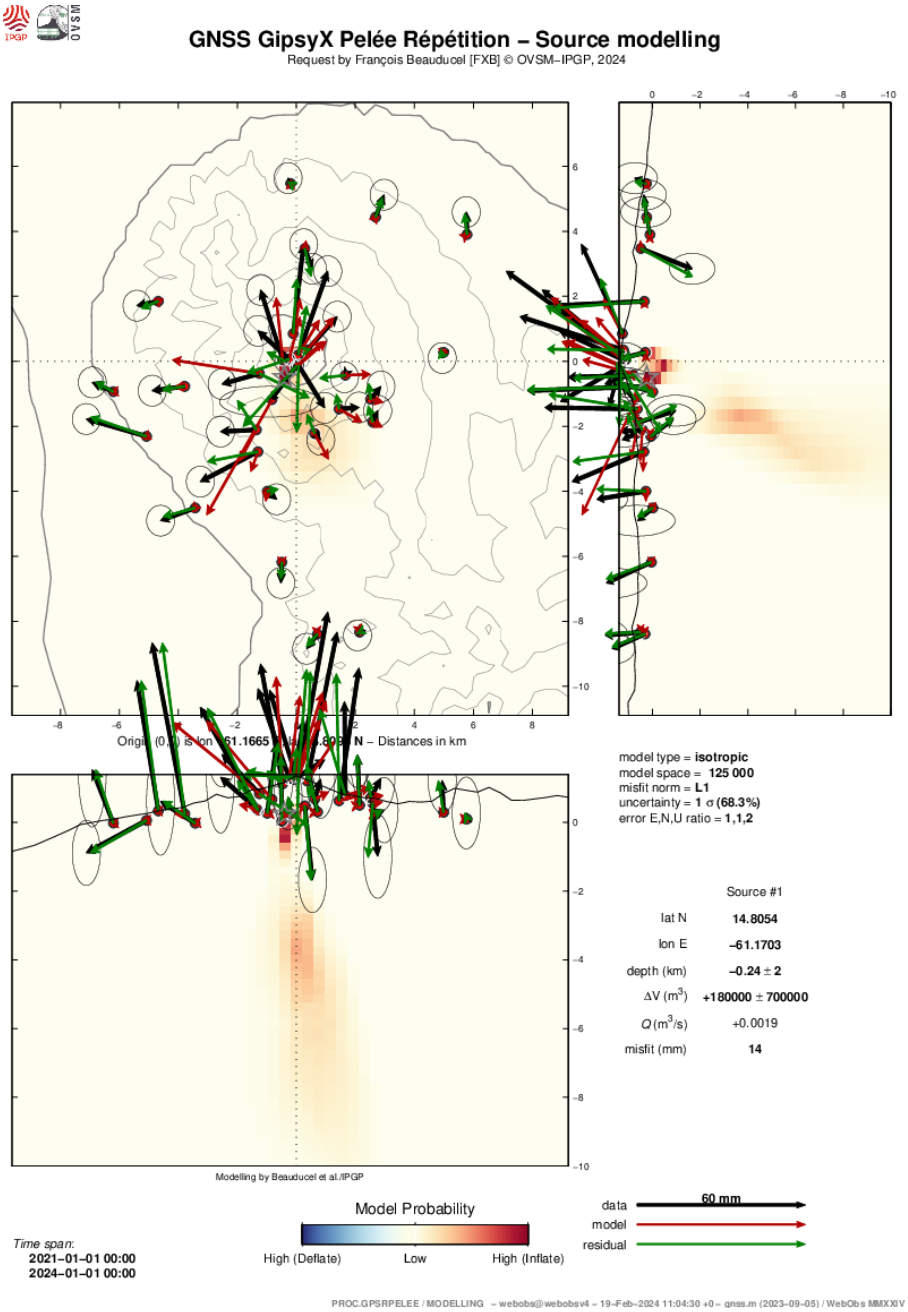


Figure 16. Modélisation 3D de l'ensemble des déplacements GNSS (stations permanentes et de répétition) sur 3 années (du 1er janvier 2021 au 31 décembre 2023) par inversion bayésienne d'une source de déformation simple et unique, vu en plan et en coupes verticales Est-Ouest et Nord-Sud : les zones colorées 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 JB de Chabalier & F. Beauducel - WebObs/OVSM.

Inclinométrie

Ces dernières années, la variation de l'inclinaison du sol et la température ont été mesurées en continu à 30 m et à 60 m de profondeur au niveau du forage situé à Ajoupa Bouillon. Malheureusement en 2023, aucune donnée n'est disponible en raison d'une panne du système d'acquisition embarqué. Le système d'acquisition a d'abord présenté une panne de carte mémoire. Celle-ci a pu être remplacée au cours de l'année 2023, mais les câbles reliant le système d'acquisition aux capteurs installés au fond du forage semblent être également endommagés, empêchant tout dialogue avec les capteurs. De nouvelles interventions sont à prévoir pour tenter de réparer ce système (le matériel utilisé est devenu obsolète et est difficile à se procurer sur le marché).

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

Forage de Puits Chaud continu

La **Figure 17** illustre les mesures réalisées en continu lors de l'année 2023 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 2023. La conductivité varie légèrement au cours de l'année, elle est comprise entre 1150 et 1300 µS/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 30,5°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.

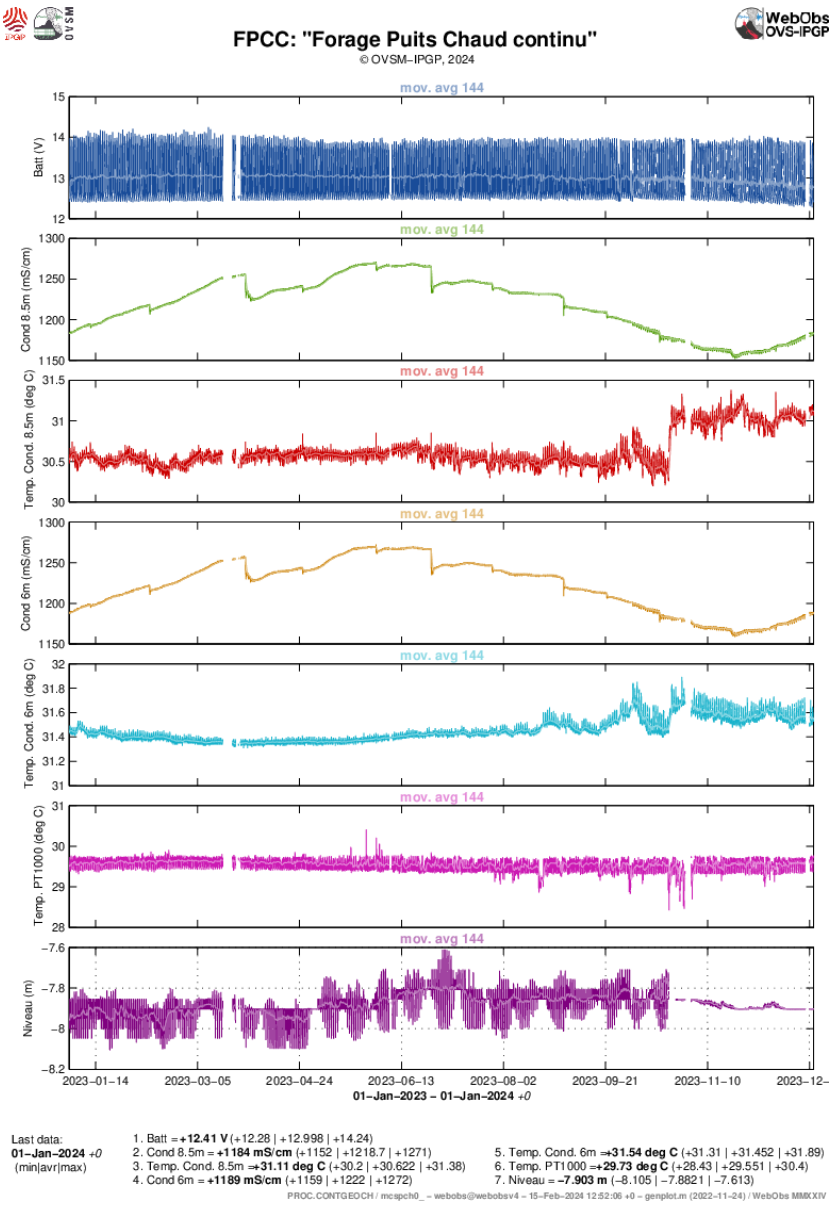


Figure 17. Mesures physico-chimiques réalisées en continu au forage de Puits Chaud en 2023 (source WebObs / OVSM).

Les mesures réalisées mensuellement au forage de Puits Chaud en 2023 sont synthétisées dans le **Tableau 3** ci-dessous.

Mois	Jan	Fév	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil	Août	Sept	Oct	Nov	Déc
T°C	31.0	31.0	31.8	31.7	31.8	31.7	31.6	31.9	30.9	31.5	31.5	31.1
Conductivité µS/cm	1276	1297	1376	1342	1351	1353	1324	1303	1291	1244	1267	1246
pH	6.53	6.72	6.56	6.64	6.67	6.56	6.64	6.55	6.60	6.51	6.53	6.59
HCO3- mg/L	380.20	385.20	391.15	393.12	387.45	380.16	N.R	385.43	362.18	372.24	365.18	354.47

Tableau 3. Mesures physico-chimiques réalisées au forage de Puits Chaud en 2023. N.R = Non réalisé.

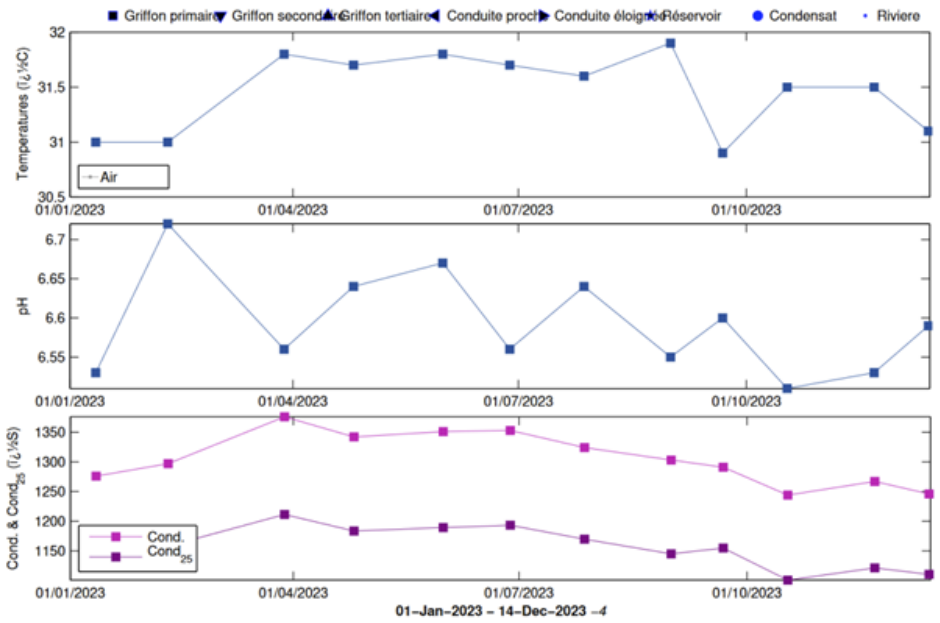


Figure 18. Évolution des paramètres physico-chimiques de Puits Chaud en 2023 (source WebObs / OVSM).

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). En octobre 2023, une sonde de température de type Tinytag permettant de faire le suivi en continu de la température a été installé à FCR1. Les résultats pour l'année 2023 sont présentés dans le **Tableau 4** et le **Tableau 5**.

Mois	Jan	Fév	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil	Août	Sept	Oct	Nov	Déc
T°C	27.3	27.4	27.3	27.8	27.7	27.9	27.7	27.9	27.8	27.7	27.8	27.7
Conductivité µS/cm	289	278	295	284	278	286	280	281	278	283	307	270
pH	6.75	6.85	7.35	7.14	6.89	6.78	6.80	6.88	6.67	6.70	6.66	6.69
HCO3- mg/L	112.85	121.43	123.91	109.45	110.26	115.10	141.06	121.15	117.86	114.22	110.86	119.08

Tableau 4. Mesures physico-chimiques réalisées à FCR1 en 2023. *N.R (Non réalisé)

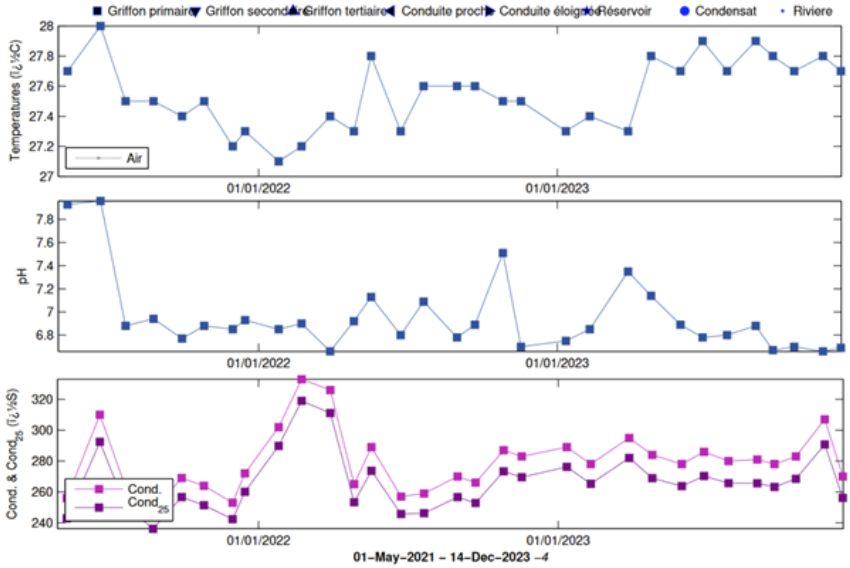


Figure 19. Évolution des paramètres physico-chimiques de FCR1 entre mai 2021 et décembre 2023 (source WebObs / OVSM).

Mois	Jan	Fév	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil	Août	Sept	Oct	Nov	Déc
T°C	27.0	26.7	27.1	N.R	27.7	27.2	27	N.R	27.7	27.3	27	26.9
Conductivité µS/cm	378	375	370	N.R	382	395	376	N.R	404	381	390	379
pH	6.74	6.77	6.85	N.R	6.87	6.84	6.87	N.R	6.80	6.85	6.79	6.76
HCO3- mg/L	135.72	137.63	145.83	N.R	140.60	144.12	151.74	N.R	147.25	139.58	132.15	128.37

Tableau 5. Mesures physico-chimiques réalisées à FCR2 en 2023. *N.R (Non réalisé)

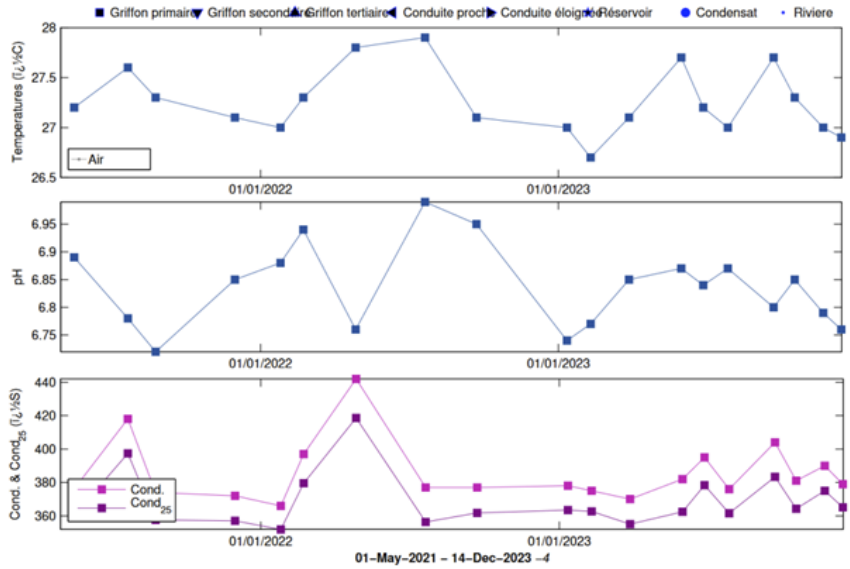


Figure 20. Évolution des paramètres physico-chimiques de FCR2 entre mai 2021 et décembre 2023 (source WebObs / OVSM).

Rivière du Prêcheur

Les mesures réalisées mensuellement dans la rivière du Prêcheur en 2023 sont synthétisées dans le **Tableau 6** ci-dessous.

Mois	Jan	Fév	Mars 03/03/23	Mars 28/03/23	Avril	Mai	Juin	Juil	Août	Sept	Oct	Nov	Déc
T°C	23.4	22.2	26	26.3	25.3	26.6	26.3	27.9	27.8	28.1	24.6	23.3	23.1
Conductivité µS/cm	143	121.1	151	152	149.9	149	149.5	140.5	153.4	138.4	156	155.2	139.1
pH	8.03	7.80	8.12	8.23	7.89	8.21	8.05	7.99	8.33	8.07	8.08	7.91	7.86
HCO3- mg/L	73.77	71.20	74.32	79.11	71.23	78.54	69.34	80.83	72.27	68.74	72.26	78.17	76.23

Tableau 6. Mesures physico-chimiques réalisées dans la rivière du Prêcheur en 2023. *N.R (Non réalisé)

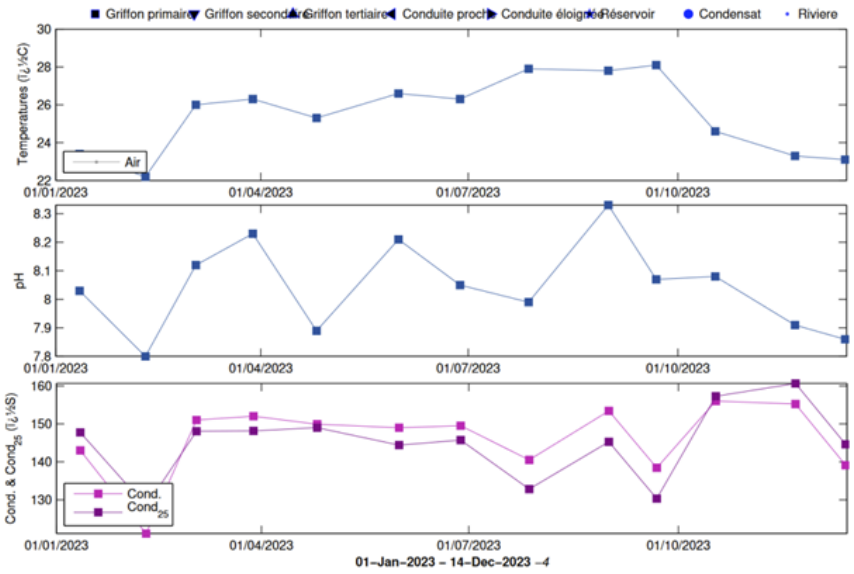


Figure 21. Évolution des paramètres physico-chimiques de la rivière du Prêcheur en 2023 (source WebObs / OVSM).

Source Mitan

Les mesures réalisées à source Mitan en 2023 sont synthétisées dans le **Tableau 7** ci-dessous.

Mois	Janvier 2023			
Site	Source Mitan 1	Source Mitan 2	Source Mitan 3	Rivière Mitan
T°C	26.1	24.5	23.1	23.5
Conductivité µS/cm	358	360	222	283
pH	6.29	6.42	6.52	7.14
HCO3- mg/L	195.91	193.18	148.07	169.16

Tableau 7. Mesures physico-chimiques réalisées à source Mitan en 2023.

Sources chaudes et rivière Chaude

Les mesures réalisées en moyenne 1 à 6 fois par an aux Sources Chaudes et dans la rivière Chaude sont synthétisées pour l'année 2023 dans le **Tableau 8** ci-dessous.

Mois	Jan	Fév	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil	Août	Sept	Oct	Nov	Déc
SC4												
T°C	34.0	N.R	N.R	N.R	N.R	N.R	N.R	32.9	N.R	N.R	N.R	N.R
Conductivité µS/cm	1294	N.R	N.R	N.R	N.R	N.R	N.R	1226	N.R	N.R	N.R	N.R
pH	6.12	N.R	N.R	N.R	N.R	N.R	N.R	6.10	N.R	N.R	N.R	N.R
HCO_3- mg/L	815.77	N.R	N.R	N.R	N.R	N.R	N.R	844.47	N.R	N.R	N.R	N.R
Rivière Chaude												
T°C	25.2	N.R	N.R	N.R	N.R	N.R	N.R	25.4	N.R	N.R	N.R	N.R
Conductivité µS/cm	645	N.R	N.R	N.R	N.R	N.R	N.R	789	N.R	N.R	N.R	N.R
pH	7.37	N.R	N.R	N.R	N.R	N.R	N.R	7.50	N.R	N.R	N.R	N.R
HCO_3- mg/L	409.10	N.R	N.R	N.R	N.R	N.R	N.R	659.94	N.R	N.R	N.R	N.R

Tableau 8. Mesures physico-chimiques réalisées aux Sources Chaudes et dans la rivière Chaude en 2023. *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.

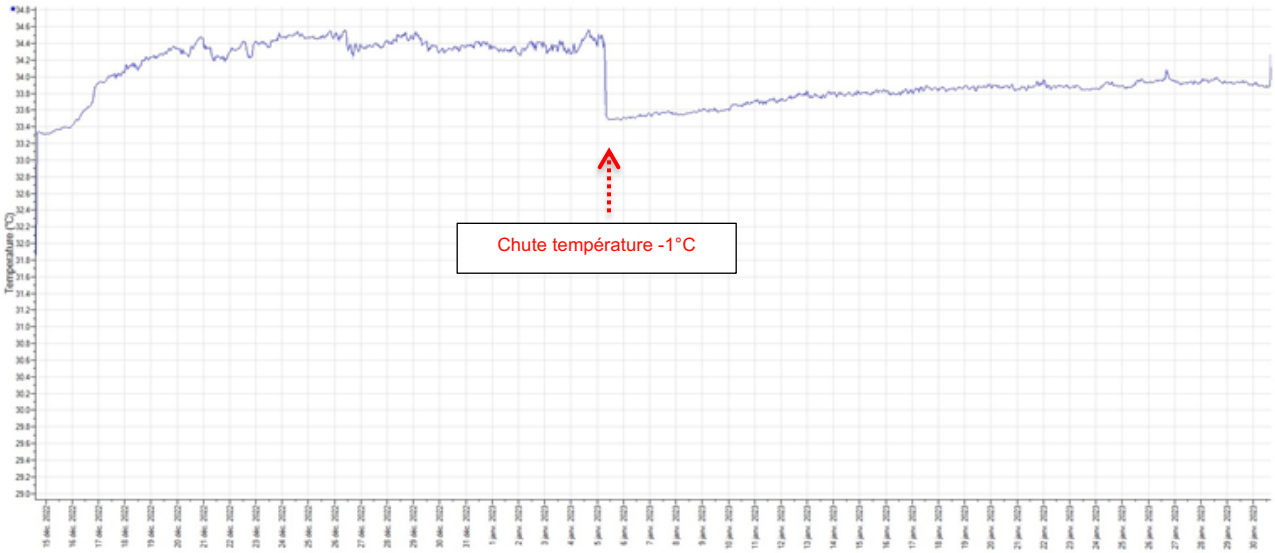


Figure 23. Suivi temporel de la température de la source SC4 enregistrée par une sonde Tinytag entre décembre 2022 et janvier 2023.

La **Figure 23** montre les résultats du suivi en continu de la température de la source SC4 entre le 15 décembre 2022 et le 30 janvier 2023. On observe une chute de température de SC4 le 05/01/2023 qui correspond aux fortes précipitations qui sont tombées et qui ont transporté beaucoup de sédiments dans le lit de la Rivière Chaude. L'absence d'une grande partie des données en 2023 est liée à un problème de batterie interne au niveau de la sonde.

Deux missions de prélèvements ont été effectuées en 2023 sur le site de la rivière Chaude : en janvier et août 2023. Des analyses en anions, cations et gaz dissous ont été réalisées, en collaboration avec T. Labasque (Géosciences Rennes, OSUR, Univ de Rennes 1), le Centre de Recherches Pétrographiques Géochimiques (CRPG-CNRS) de Nancy (Univ de Lorraine), l'OVSG et l'IPGP. Suite aux analyses en gaz dissous réalisées en 2023, on observe toujours un enrichissement en CO_2 et ^4He au niveau de la source SC4. Les résultats d'analyses des ratios des isotopes de l'hélium ($^3He/^4He$) et du néon ($^4He/^{20}Ne$) réalisées au CRPG-CNRS sur les échantillons prélevés à SC4, indiquent qu'une grande proportion de l'hélium provient du pôle mantellique (92 à 93%, voir **Tableau 11**).

Dans le cadre du suivi géochimique des sources thermales de la Montagne Pelée, l'OVSM-IPGP a fait l'acquisition en novembre 2023 d'un titreur automatique Metrohm permettant de réaliser des analyses de routine, tel que des mesures d'alcalinité (**Figure 24**).

Figure 24. Eco Titrator Metrohm Photo OVSM-IPGP.

Forage du Prêcheur

Dans le cadre d'un suivi des forages autour de la Montagne Pelée débuté en 2021, l'OVSM-IPGP avait enregistré en 2022 des valeurs de CO_2 au-dessus de la valeur standard atmosphérique avec quelques variations sur le forage de la rivière du Prêcheur. En 2023, par rapport à des travaux réalisés sur ce site, seules deux mesures à proximité du forage ont été réalisées. Des concentrations en CO_2 au-dessus de la valeur standard atmosphérique ont été mesurées à proximité du forage (**Tableau 9**).

Site	Forage rivière du Prêcheur	
Mois	Mars 2023	Novembre 2023
Concentration en CO_2 (ppm)	648	1074

Tableau 9. Concentration en CO_2 à proximité du forage de la rivière du Prêcheur en mars et novembre 2023.

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. Une caméra thermique permettant de détecter les sources de chaleur a également été achetée en novembre 2023 (**Figure 25**).

Figure 25. Chambre d'accumulation (à gauche) pour la mesure du gaz CO_2 et H_2S émis au niveau du sol et la caméra thermique (à droite). Photos 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 fumerollienne n'a été observée sur les flancs et au sommet de la Montagne Pelée en 2023.

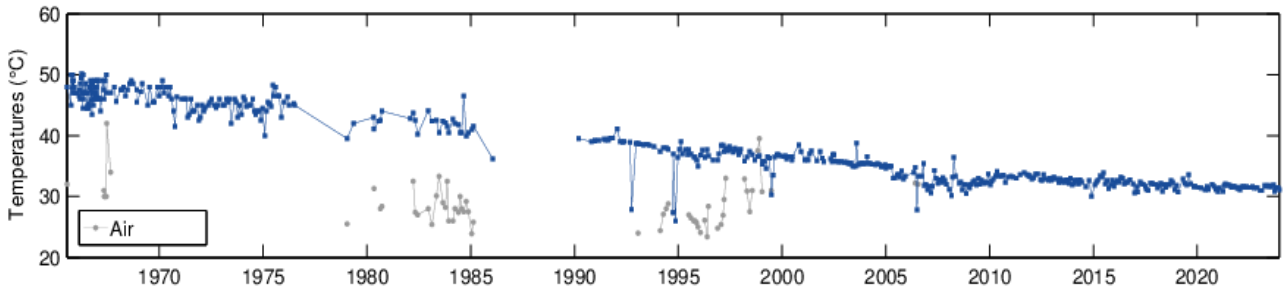


Figure 26. Décroissance de la température de Puits Chaud depuis 1965 (points bleus) (source WebObs / OVSM).

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 satellitales, 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 héliportés (soutien de la Sécurité civile) et par imagerie satellitale. 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 satellitales 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 27**).

Figure 27. Survol héliporté (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. 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.

En 2023, il y a eu deux survols en hélicoptère (le 19 janvier et le 24 août 2023), et cinq images satellites exploitables permettant de compléter le suivi de l'indice NDVI (**Figure 28** et **Figure 29**).

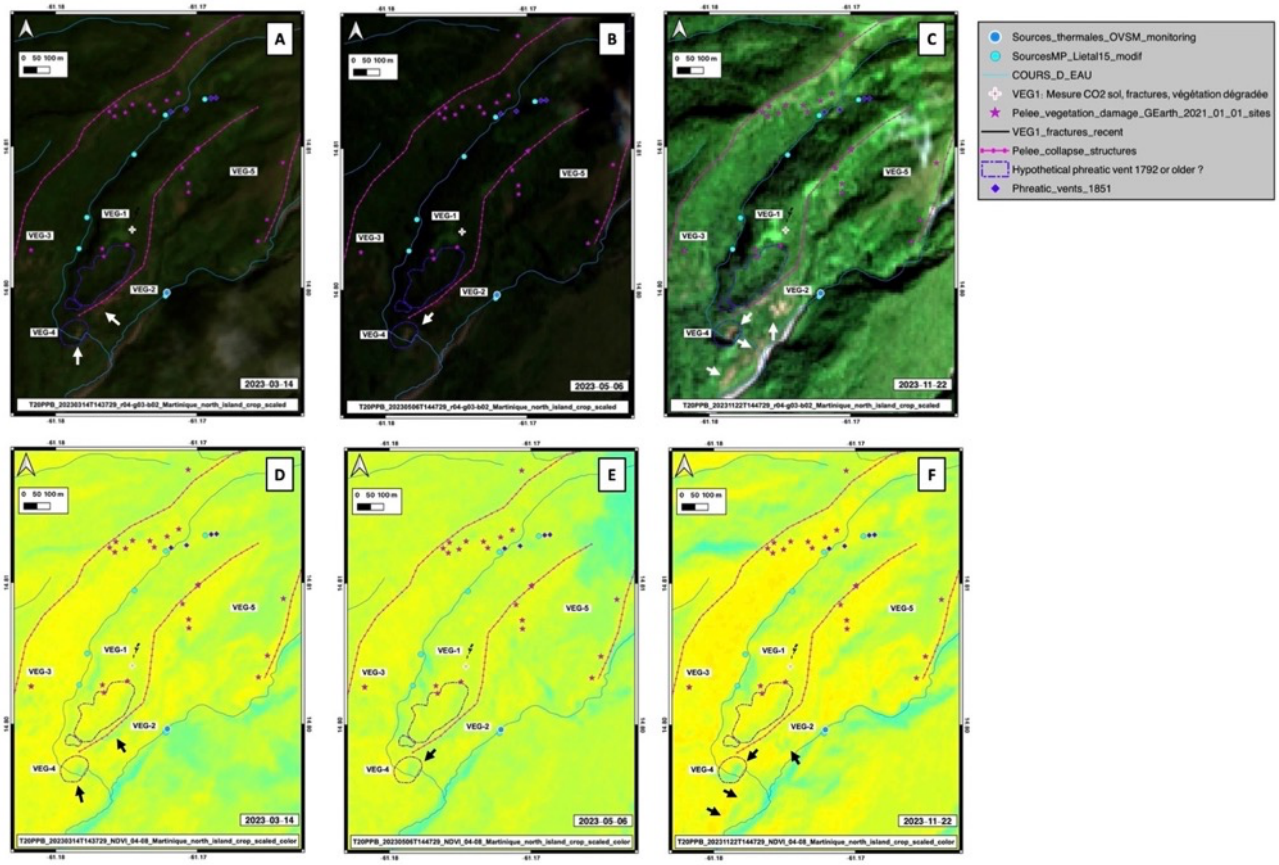


Figure 28. Suivi temporel approximatif pour l'année 2023 du dépérissement de la végétation sur le flanc sud-ouest de la Montagne Pelée engendré par le dégazage passif de CO_2 dans le sol via la cartographie du NDVI (Normalized Difference Vegetation index / indice de végétation par différence normalisé) à partir du traitement de l'imagerie satellitale (Planet). Le NDVI est construit à partir des canaux rouge (R) et proche infrarouge (PIR) des images satellitales. L'indice de végétation normalisé met en valeur la différence entre la bande visible du rouge et celle du proche infrarouge. NDVI=(PIR-R)/PIR+R). Cet indice est sensible à la vigueur et à la quantité de végétation. La végétation saine non dégradée est en jaune, plus la couleur est verte voire vert turquoise, sur une image NDVI Sentinel_2, plus la végétation est dégradée à condition de ne pas être dans une zone d'ombre, de nuage et de lit rocheux de rivière qui donnent aussi des signatures NDVI comme la végétation dégradée. Il faut donc comparer avec l'image visible pour détecter les zones d'ombre, de nuages et de lit de rivière. **A.** 2023-03-14, Image Sentinel-2, T20PPB_20230314T143729_r04-g03-b02_Martinique_north_island_crop_scaled, composition en lumière visible. **B.** 2023-05-06, Image Sentinel-2, T20PPB_20230506T144729_r04-g03-b02_Martinique_north_island_crop_scaled, composition en lumière visible. **C.** 2023-11-22, Image Sentinel-2, T20PPB_20231122T144729_r04-g03-b02_Martinique_north_island_crop_scaled, composition en lumière visible. **D.** 2023-03-14, Image Sentinel-2, T20PPB_20230314T143729_NDVI_04-08_Martinique_north_island_crop_scaled_color, composition index NDVI. On note les zones de végétation dégradée (flèches noires) marquées VEG-2, VEG-4. **E.** 2023-05-06, Image Sentinel-2, T20PPB_20230506T144729_NDVI_04-08_Martinique_north_island_crop_scaled_color, composition index NDVI. On note la zone de végétation dégradée (flèches noires) marquée VEG-4. **F.** 2023-11-22, Image Sentinel-2, T20PPB_20231122T144729_NDVI_04-08_Martinique_north_island_crop_scaled_color, composition index NDVI. On note les zones de végétation dégradée (flèches noires) marquées VEG-2, VEG-4, et une nouvelle zone entre la zone VEG-4 et le lit de la rivière Chaude. © Sentinel-2, © ESA, CNES, COPERNICUS, DINAMIS. Traitement imagerie NDVI : R. Grandin, IPGP-UP, SNO ISDeform (INSU-CNRS). Cartographie SIG : J-C Komorowski, IPGP-UP, SNOV (INSU-CNRS).

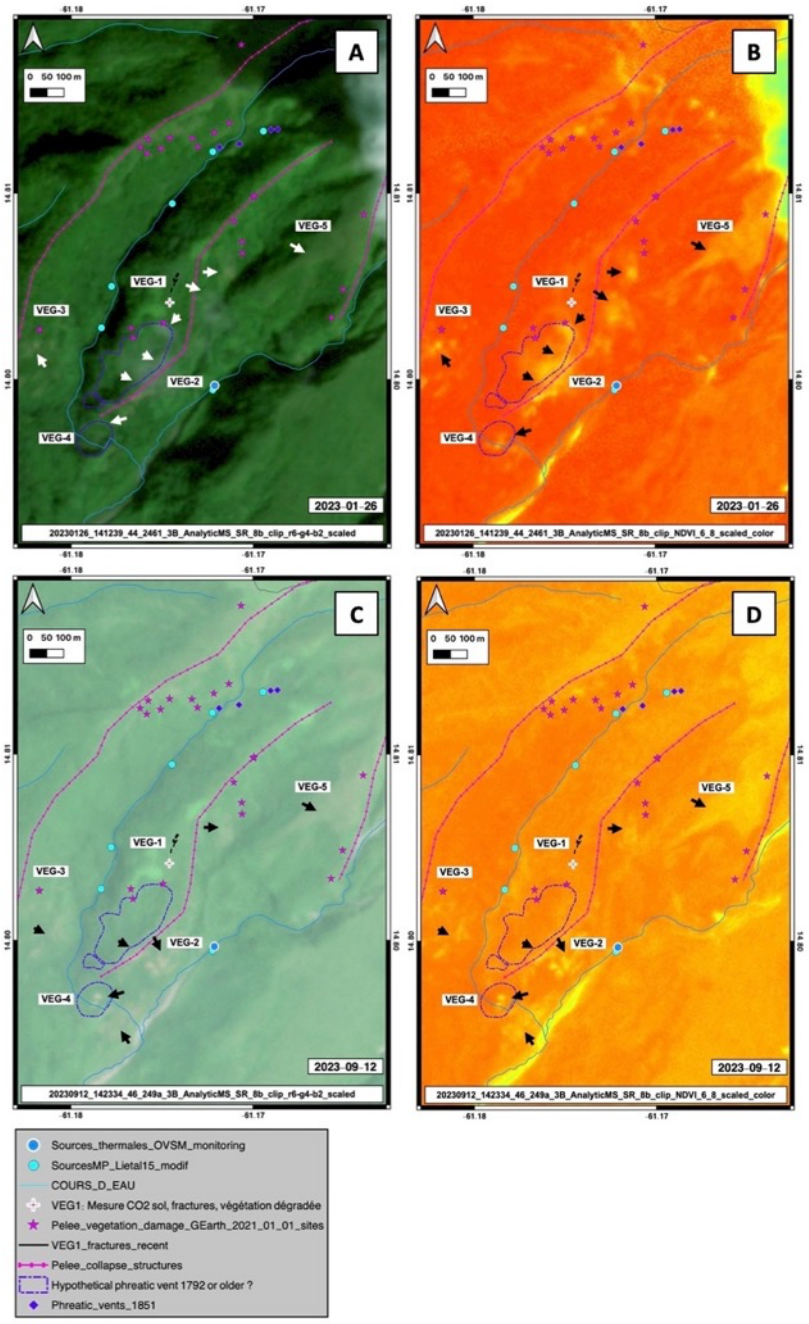


Figure 29. Suivi temporel approximatif pour l'année 2023 du dépérissement de la végétation sur le flanc sud-ouest de la Montagne Pelée engendré par le dégazage passif de CO_2 dans le sol via la cartographie du NDVI (Normalized Difference Vegetation index / indice de végétation par différence normalisé) à partir du traitement de l'imagerie satellitale (Planet). Le NDVI est construit à partir des canaux rouge (R) et proche infrarouge (PIR) des images satellitales. L'indice de végétation normalisé met en valeur la différence entre la bande visible du rouge et celle du proche infrarouge. NDVI=(PIR-R)/PIR+R). Cet indice est sensible à la vigueur et à la quantité de végétation. La végétation saine non dégradée est en orange, plus la couleur est jaune voire vert très clair, sur une image NDVI Planet, plus la végétation est dégradée à condition de ne pas être dans une zone d'ombre, de nuage et de lit rocheux de rivière qui donnent aussi des signatures NDVI comme la végétation degradé. Il faut donc comparer avec l'image visible pour détecter les zones d'ombre, de nuages et de lit de rivière. **A.** 2023-01-26, Image Planet, 20230126_141239_44_2461_3B_AnalyticMS_SR_8b_clip_r6-g4-b2_scale, composition en lumière visible. **B.** 2023-01-26, Image Planet, 20230126_141239_44_2461_3B_AnalyticMS_SR_8b_clip_NDVI_6_8_scaled_color, composition index NDVI. On note les zones de végétation dégradée (flèches blanches) marquées VEG-2, VEG-3, VEG-4, VEG-5. **C.** 2023-09-12, Image Planet, 20230912_142334_46_249a_3B_AnalyticMS_SR_8b_clip_r6-g4-b2_scale, composition en lumière visible. **D.** 2023-09-12, Image Sentinel-2, 20230912_142334_46_249a_3B_AnalyticMS_SR_8b_NDVI_6_8_scaled_color, composition index NDVI. On note les zones de végétation dégradée (flèches blanches) marquées VEG-2, VEG-3, VEG-4, VEG-5, et une nouvelle zone entre la zone VEG-4 et le lit de la rivière Chaude. Images satellite © Planet. Traitement imagerie NDVI : R. Grandin, IPGP-UP, SNO ISDeform (INSU-CNRS). Cartographie SIG : J-C Komorowski, IPGP-UP, SNOV (INSU-CNRS).

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 2023, l'OVSM-IPGP a réalisé deux missions de mesures et de prélèvements (février et mai 2023) en collaboration avec les plongeurs du PNMM et de l'Office français de la biodiversité (**Figure 30**). Le **Tableau 10** reporte les mesures de température réalisées depuis 2021. La température moyenne au niveau des remontées de train de bulles reste légèrement supérieure à la température moyenne de la zone témoin (eau environnante sans remontées de bulles).

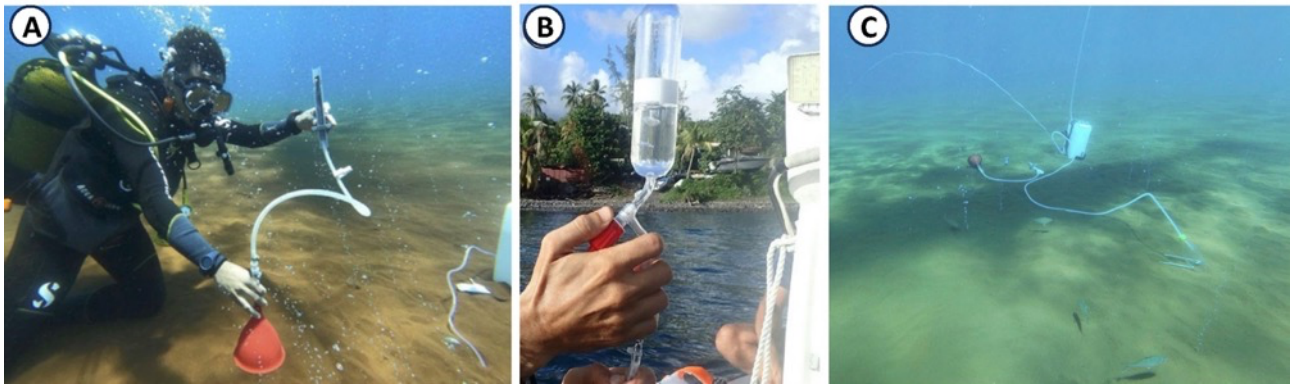


Figure 30. Photographies illustrant la méthode de mesures et de prélèvement des trains de bulles à moins de 10 m de profondeur sur un site localisé entre Saint-Pierre et le Prêcheur : a) plongeur du PNMM prélevant un échantillon, b) dispositif de prélèvement de gaz du 25-05-2023 incluant une ampoule de Giggenbach avec une solution de soude pour piéger un plus grand volume de gaz condensables acides, c) 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).

	2021					*2022*			*2023*	
	12/08	*02/09*	*15/09*	*28/10*	*15/12*	*12/07*	*13/09*	*21/11*	*02/03*	*25/05*
Température témoin (°C)	28,9	29,1	29,6	29,0	28,9	29,0	29,5	28,5	26,4	28,4
Température gaz (°C)	**30,9**	**30,5**	**30,8**	**31,0**	**29,1**	**30,0**	**30,5**	**29,5**	**27,5**	**28,6**
Écart moyen (°C)	**+2,0**	**+1,4**	**+1,2**	**+2,0**	**+0,2**	**+1,0**	**+1,0**	**+1,0**	**+1,1**	**+0,2**
pH gaz			**6,25**	**6,07**	**7,6***	**7,79**	**6,18**	**6,64**	**7,7**	**7,6**
pH témoin			8,12	8,16	9,15	7,97	8,18	8,05	8,19	8,10
pH gaz (PNMM)				**5,5**	**5,52**					
pH témoin (PNMM)				8,3	8,2					

Tableau 10. Évolution des températures et pH mesurés sur la zone de dégazage en mer entre août 2021 et mai 2023. (*) Noter que les valeurs de pH effectuées avec la sonde OVSM le 15 décembre 2021 ne sont pas considérées comme fiables étant donné la valeur du pH témoin.

Le pH a été mesuré avec des prélèvements directement à la sortie du dégazage pour être au plus près de la valeur réelle et des mesures précédentes (**Tableau 10**). En 2023, nous avons mesuré au niveau de remontées de train de bulles des anomalies de températures comprises entre +0,2 et +1,1°, et un pH compris entre 7,6 et 7,7.

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 CO_2 libéré dans cette zone de dégazage en mer possède une signature isotopique d'origine magmatique.

Les résultats d'analyses des ratios des isotopes de l'hélium ($^3He/^4He$) et du néon ($^4He/^{20}Ne$) isotopes de l'hélium réalisées au CRPG-CNRS en 2022 sur les échantillons prélevés en mer, indiquent qu'une grande proportion de l'hélium (69%) provient du pole mantellique (**Tableau 11**).

Echantillon	Date prélèvement	Site	Distance Km du volcan (conduit magmatique)	$^4He/^{20}Ne$	$^3He/^4He$ (Ra) a, b	1 sigma incertitude	^4He mantellique (%)	^4He crustal (%)	^4He atmosphérique (%)
4	05/08/2022	Gaz dissous, Source chaude (Rivière Chaude, Martinique)	1,4	14,3	7,08	0,22	87%	11%	2%
5	05/08/2022	Gaz dissous, Source chaude (Rivière Chaude, Martinique)	1,4	16,4	7,59	0,23	93%	5%	2%
6	13/09/2022	Gaz dissous, Source chaude (Rivière Chaude, Martinique)	1,4	16,8	7,51	0,23	92%	6%	2%
2	13/09/2022	Gaz, émissions sous-marines (Périnelle, Saint-Pierre)	5,8	3,3	5,97	0,18	69%	23%	8%
3	13/09/2022	Gaz, émissions sous-marines (Périnelle, Saint-Pierre)	5,8	6,7	5,75	0,18	69%	27%	4%

Tableau 11. Composition isotopique et origine de l'hélium dans les gaz dissous de la Source Chaude (Rivière Chaude) et le gaz des émissions sous-marines (Périnelle, Saint-Pierre) à la Montagne Pelée, prélevés en août et septembre 2022 par l'OVSM-IPGP avec l'aide du PNMM (analyses PH Blard, B. Tibari et L. Zimmermann, CRPG Nancy). a: Ra = 1.384e-6 = rapport atmosphérique 3He / 4He. b : en faisant l'hypothèse que tout le néon est d'origine atmosphérique, d'après Sano et al., 2006; Sano et al., 2015.

Ces premières analyses isotopiques de l'hélium pour les gaz émis par le système magmatique de la Pelée indiquent qu'à l'aplomb du conduit magmatique il y a un dégazage d'hélium d'une provenance essentiellement magmatique ($^3He/^4He$ = Ra = 7,08 à 7,59) et qu'à plus grande distance du volcan (6 km) l'hélium dans les émissions gazeuses sous-marines à Saint-Pierre montre une signature isotopique avec une contribution plus importante en hélium 4He d'origine crustale par rapport à l'hélium ^3He d'origine mantellique ($^3He/^4He$ = Ra = 5,75 à 5,97). Cette tendance a déjà été identifiée sur de nombreux volcans dont l'Ontake, le Nevado del Ruiz, et le Galeras (Sano et al., 1990, Sano et al, 1997 ; Sano et Fischer, 2013). En effet, il n'est pas étonnant qu'à l'aplomb d'un volcan actif ayant des éruptions magmatiques récentes on observe un dégazage magmatique profond d'origine mantellique. En revanche, sur le volcan Ontake, Sano et al. (2015) ont mesuré une augmentation du rapport $^3He/^4He$ sur une décennie jusqu'au moment de l'éruption de 2014, qu'ils ont interprétée comme résultant d'un processus de pressurisation progressive du système

hydrothermal superficiel du volcan par des remontées nouvelles de gaz magmatiques profonds d'origine mantellique à l'aplomb du conduit principal et non pas résultant d'un dégazage d'un magma stagnant en profondeur.

Compte tenu de ces premiers résultats, nous allons suivre, probablement 2 fois par an, l'évolution de ce rapport isotopique $^{3}He/^{4}He$ dans les gaz dissous de la Source Chaude et des émissions gazeuses sous-marines car cela pourrait se révéler un bon proxy de la dynamique profonde de dégazage du système magmatique de la Pelée, de la signature magmatique de la réactivation en cours depuis avril 2019, et de son évolution potentielle.

La superficie mesurée le 25 mai 2023 est similaire (1553 m^2) à celle déterminée lors de la précédente mesure le 2 mars 2023 (1488 m^2), voir **Figure 31**. Sur les 5 derniers prélèvements depuis le 12 juillet 2022 la moyenne est de 1287 ± 322 m^2 avec un minimum de 770 m^2 le 21 novembre 2022 et un maximum de 1553 m^2 le 25 mai 2023. Mise à part la valeur minimale du 21 novembre 2022, qui pourrait être liée à des forçages en lien avec la pluviométrie, la météorologie marine et la dynamique sédimentaire, la superficie du champ d'émission est stable sur les derniers 10 mois.

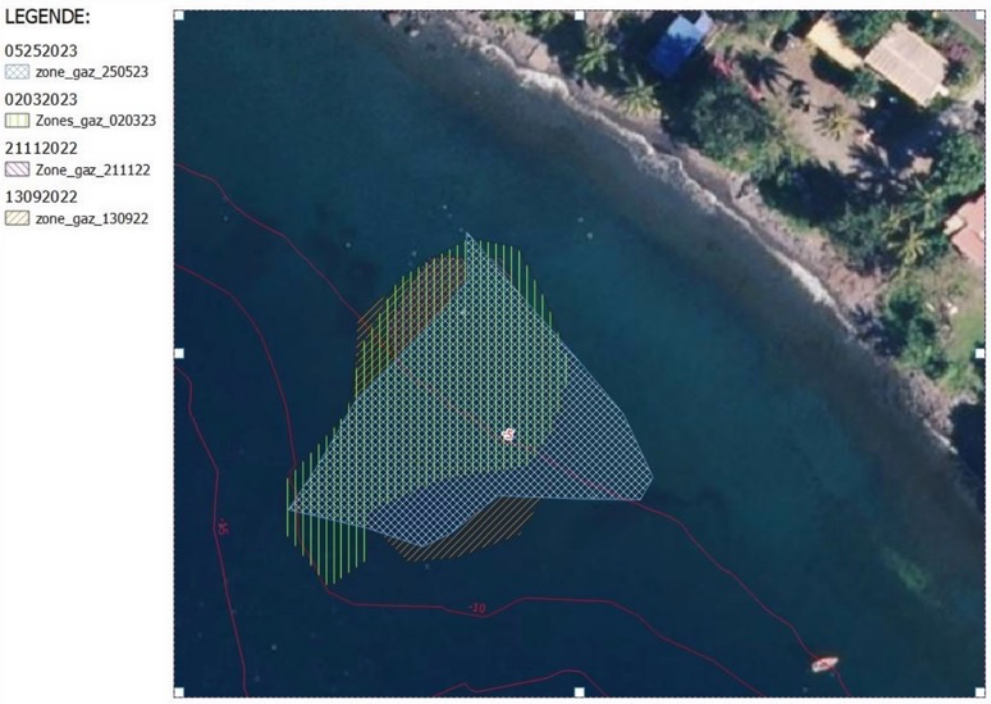


Figure 31. Évolution temporelle de la superficie de la zone de dégazage en mer entre le 12 juillet 2022 (zone en vert) et le 25 mai 2023 (zone en bleu). Source A. Potier / PREST / OVSM-IPGP.

Glissements de terrain et lahars

Glissements de terrain

Les glissements de terrain sont un phénomène lié 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 continuel (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 2023, nous avons ainsi observé au moins **221 éboulements** (voir **Figure 32**).

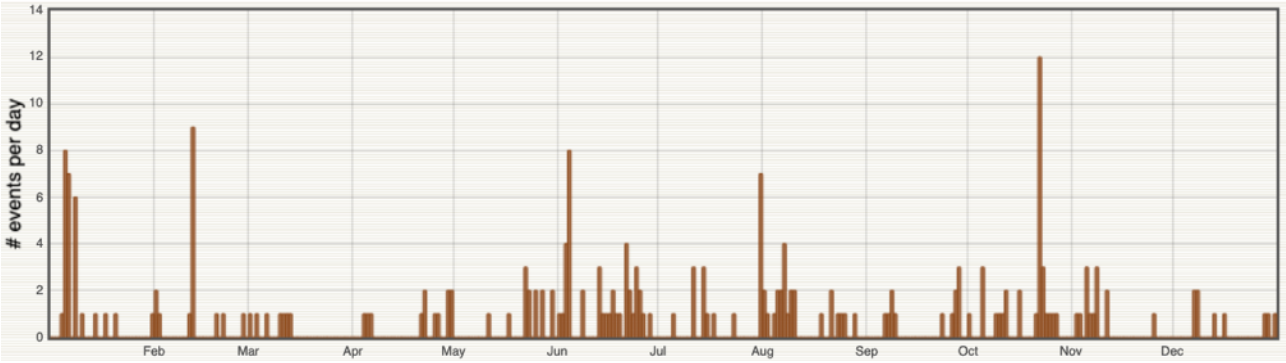


Figure 32. Distribution du nombre journalier d'éboulements dans le catalogue de l'OVSM IPGP pour l'année 2023 (source WebObs/OVSM).

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 deux 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, un survol héliporté avec le concours du D972 a été effectué le 25 avril 2023 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.

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 de particules microniques 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.

L'OVSM-IPGP a identifié **1 lahar** le 22 octobre 2023 à 00h31 (heure locale) qui a déclenché la sirène au niveau du bourg du Prêcheur. Ce lahar est lié à un fort épisode pluvieux (vigilance ORANGE fortes pluies et orages de Météo France).

L'OVSM-IPGP a également identifié **3 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, le 24 mars 2023 et les 20 et 21 août 2023 (vigilances ORANGE et JAUNE fortes pluies et orages de Météo France).

Synthèse de l'activité de la Montagne Pelée

Les principales observations et actions effectuées par l'OVSM-IPGP depuis le début de la réactivation sont représentées à la **Figure 33** sous forme de diagramme temporel synthétique.

Le 7 décembre 2023, le comité d'experts en volcanologie (CEV) de l'IPGP, qui inclut la direction de l'OVSM (F. Beauducel et J. Corbeau) comme membres permanents, s'est réuni pour évaluer l'évolution de l'activité en cours à la Montagne Pelée et réfléchir à une éventuelle modification du système de niveaux d'activité/alerte pour les observatoires volcanologiques de l'IPGP. Une ré-analyse du niveau d'activité de la Montagne Pelée pourrait, le cas échéant, déboucher sur une recommandation au Préfet sur le niveau d'alerte jaune (maintien ou baisse). Les réflexions sont toujours en cours et aucune décision n'a encore été actée à la date de rédaction de ce rapport.

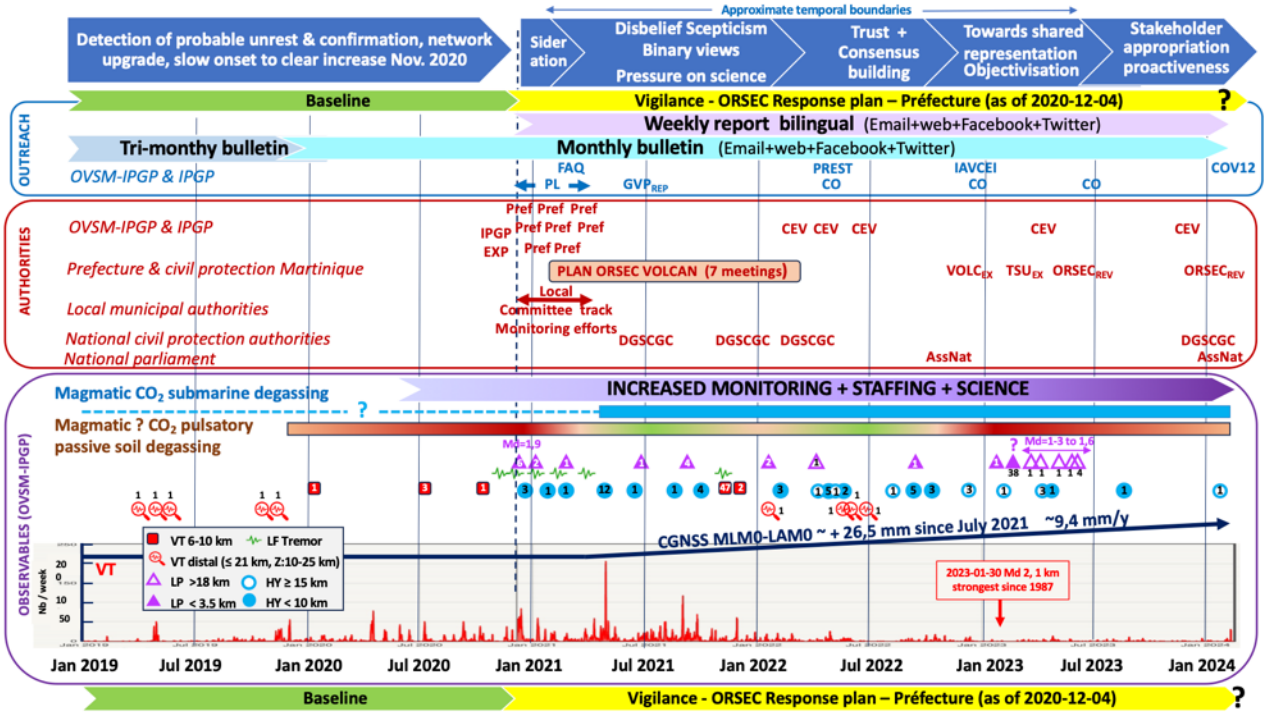


Figure 33. Synthèse des observations, actions des autorités et informations relatives à l'activité de la Montagne Pelée depuis début 2019. Source : JC Komorowki / IPGP.

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*").

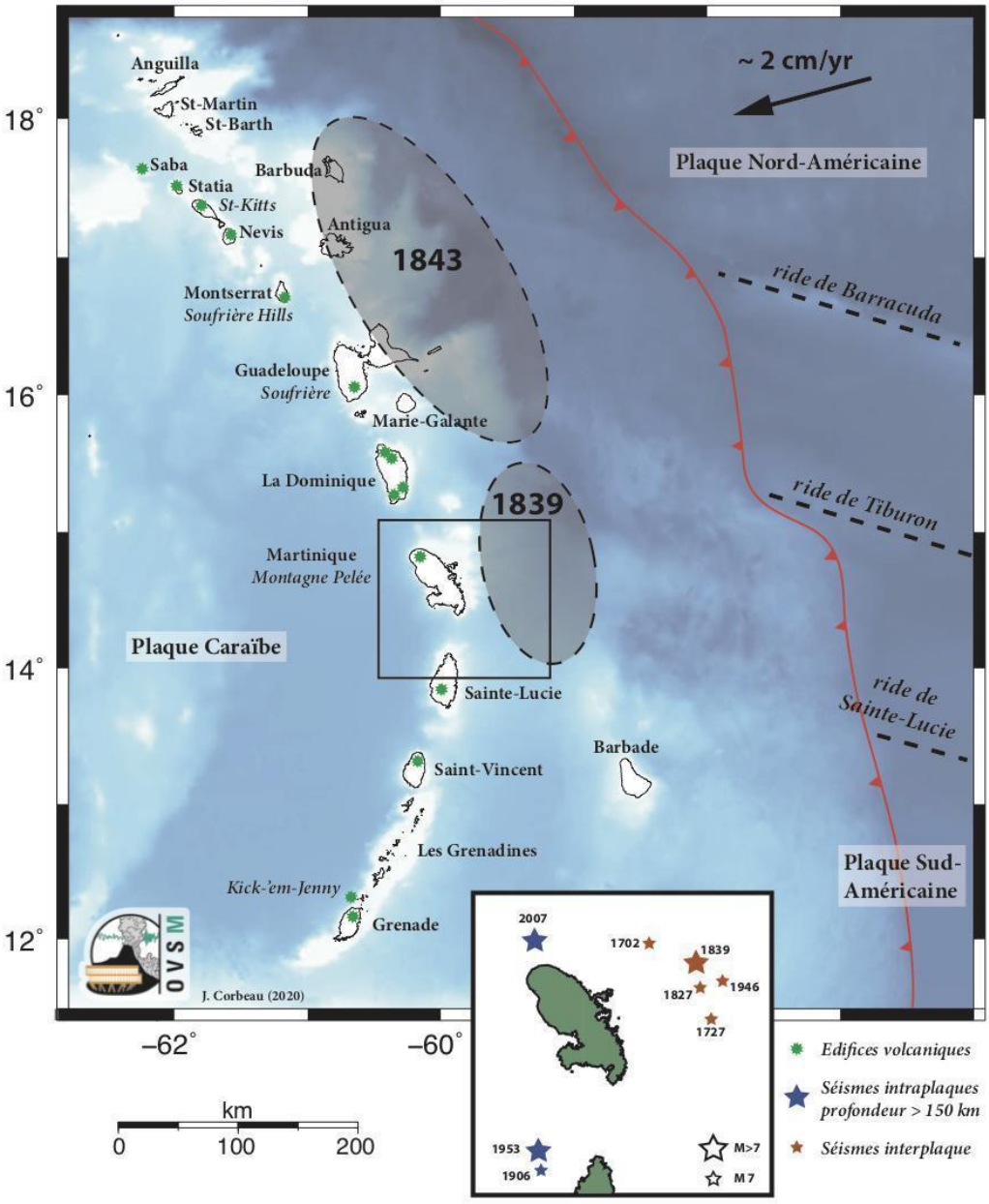


Figure 28. Contexte tectonique de l'arc volcanique des Petites Antilles. Les plaques tectoniques Nord-Américaine et Sud-Américaine entrent en subduction sous la plaque Caraïbe à une vitesse d'environ 2 cm/an. Les étoiles vertes indiquent la localisation des volcans. Les ellipses grises indiquent les 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. Source : J. Corbeau / OVSM-IPGP, d'après Feuillet et al. (2011).

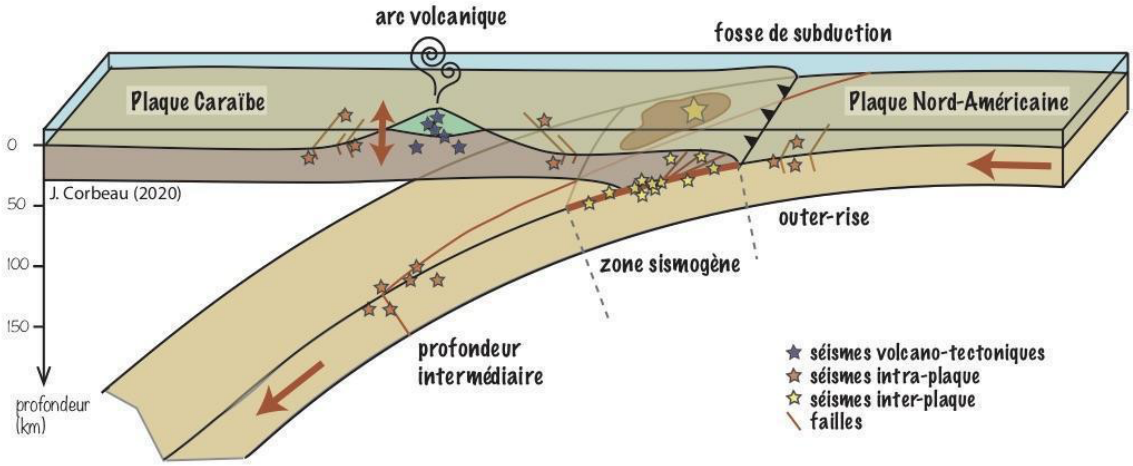


Figure 29. Schéma conceptuel de la zone de subduction des Petites Antilles vue en fonction de la profondeur. Les étoiles de couleur indiquent les différents types de séismes enregistrés en Martinique. Source : J. Corbeau / OVSM-IPGP.

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 2023, l'OVSM-IPGP a identifié **1165 séismes régionaux d'origine tectonique** au niveau de l'arc des Petites Antilles et **182 téléséismes** (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 **759 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 liée à l'alignement Nord-Sud des îles peut engendrer des incertitudes plus grandes de l'ordre de la dizaine de kilomètres.

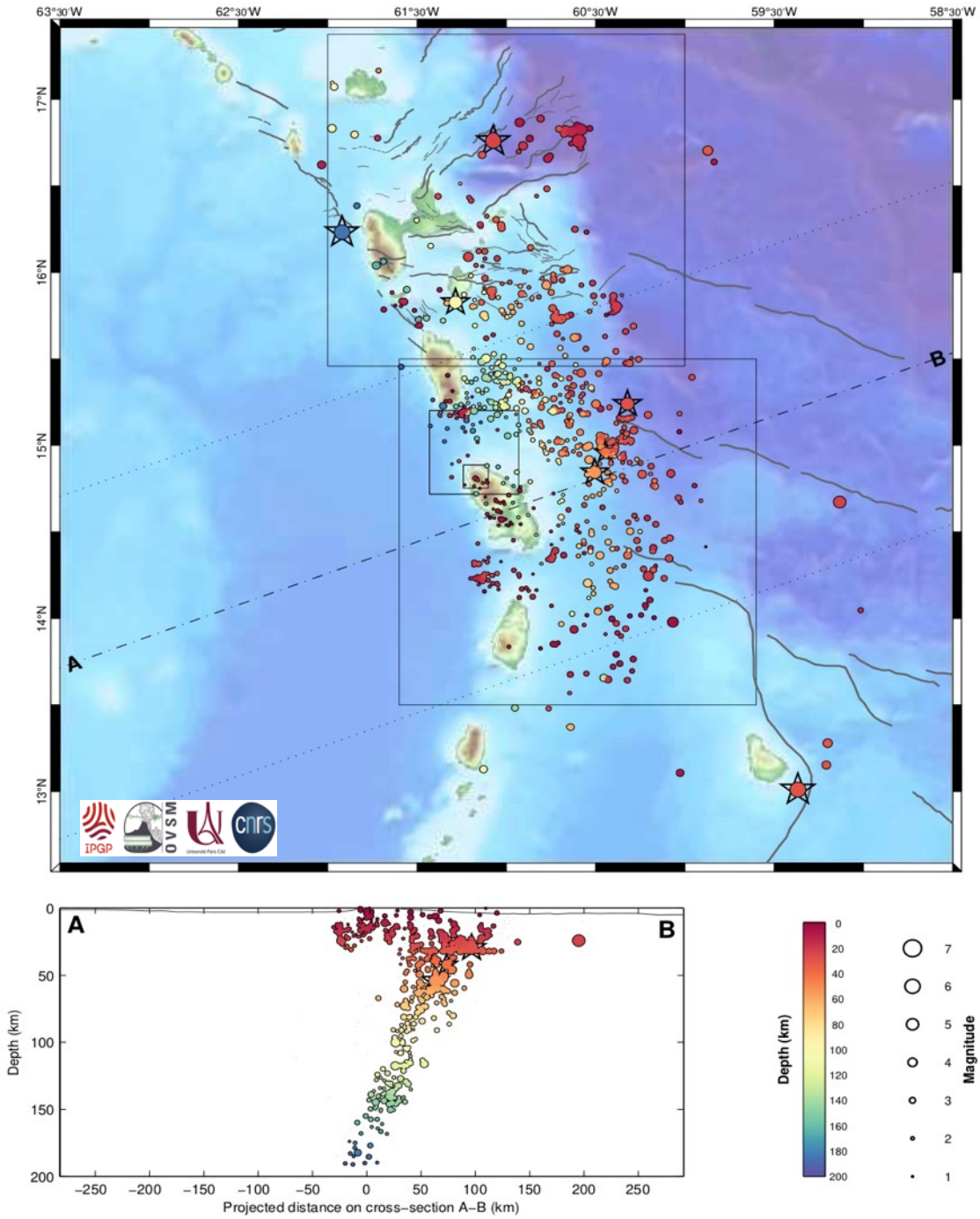


Figure 30. Partie supérieure : carte des épicentres des séismes enregistrés et localisés par l'OVSM-IPGP au cours de l'année 2023 sur l'arc Antillais. Partie inférieure : représentation des hypocentres des séismes en fonction de la profondeur, suivant le profil A-B indiqué sur la carte. Les étoiles représentent les séismes ressentis en Martinique (source WebObs/OVSM).

En 2023, 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**

31). 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 28**).

- 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**).

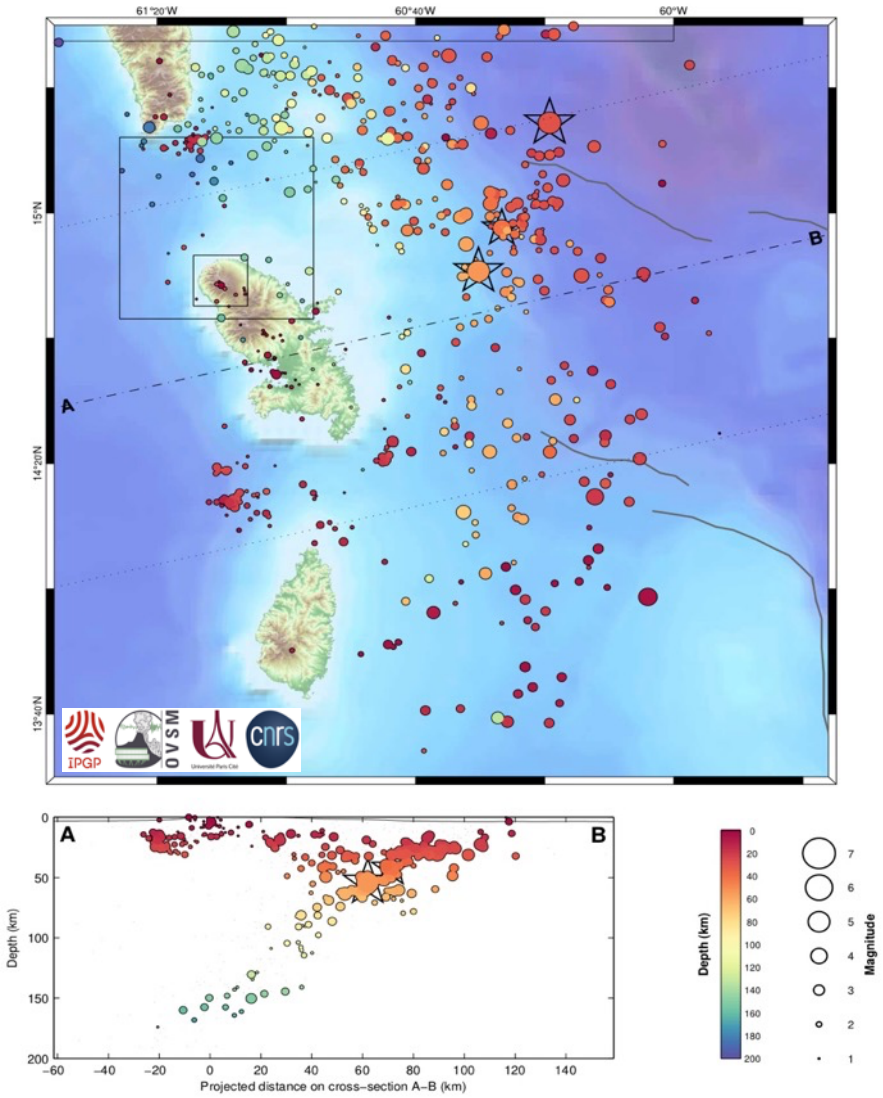


Figure 31. Partie supérieure : carte des épicentres des séismes enregistrés et localisés par l'OVSM-IPGP au cours de l'année 2023 autour de la Martinique. Partie inférieure : représentation des hypocentres des séismes en fonction de la profondeur, suivant le profil A-B indiqué sur la carte. Les étoiles représentent les séismes ressentis en Martinique (source WebObs/OVSM).

Le graphique présenté en **Figure 34** indique pour chaque année, entre 2013 et 2023, le nombre total de séismes d'origine tectonique enregistrés (en vert) ainsi que le nombre de séismes localisés manuellement parmi ces derniers (en rose). La courbe bleue précise le pourcentage de séismes localisés chaque année. Nous pouvons remarquer que durant ces dix dernières années, le nombre de séismes enregistrés varie entre 866 (en 2013) et 1397 (en 2015). Le pourcentage de localisation quant à lui a diminué d'environ 95 % à 65 %.

Cette diminution peut notamment s'expliquer par le fait que le seuil de détection des séismes a baissé ces dernières années : en effet, avec l'amélioration des réseaux et la modernisation des instruments, la capacité à détecter de très petits évènements a augmenté, mais ces petits évènements sont difficilement localisables avec précision.

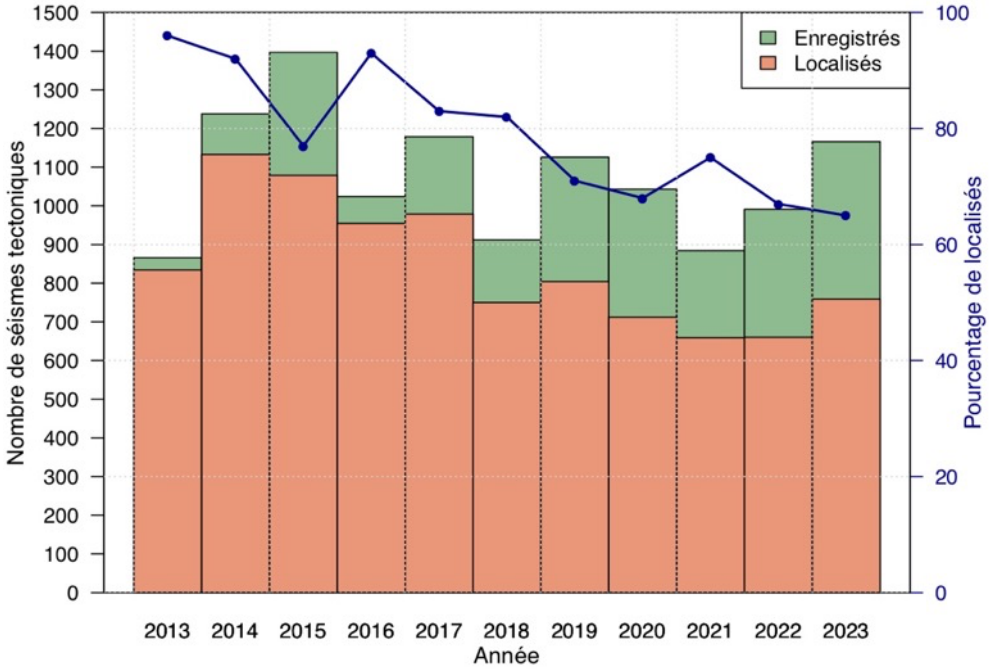


Figure 34. Nombre total de séismes d'origine tectonique enregistrés par l'OVSM-IPGP chaque année entre 2013 et 2023 (en vert), et nombre de séismes localisés manuellement parmi ceux-ci (en rose). La courbe bleue indique le pourcentage de séismes localisés. Données WebObs/OVSM.

Sismicité ressentie

Au cours de l'année 2023, l'observatoire a enregistré et localisé en moyenne **63 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 de permanence. Si ce message d'alerte est associé à au moins deux témoignages indépendants de personnes ayant ressenti la secousse, la personne de permanence procède immédiatement au traitement des données, afin de localiser le séisme et de calculer sa magnitude, et prévient le SIDPC. Elle émet ensuite un bulletin d'information (appelé B^3 - « B cube ») qui contient les caractéristiques du séisme et une carte indiquant les intensités prédites de la secousse 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 2023, il y a eu **8 séismes ressentis** en Martinique (représentés par les étoiles sur les **Figures 30 et 31**), d'intensités I-II à V :

- le **16 janvier 2023** à 11h43 heure locale, magnitude **M_{Lv} 4,2,** profondeur 42 km, à environ 61 km à l'est-nord-est de Trinité (intensités probables moyennes de **I à II** d'après le communiqué B3 correspondant) ;
- le **20 janvier 2023** à 07h23 heure locale, magnitude **M_{Lv} 5,9,** profondeur 184 km, à environ 27 km à l'ouest de la Guadeloupe (intensités probables moyennes de **I à II** d'après le communiqué B3 correspondant) ;
- le **16 avril 2023** à 07h22 heure locale, magnitude **M_{Lv} 4,7,** profondeur 103 km, à environ 6 km au sud-est de la Guadeloupe (intensités macrosismiques maximales de **III à IV**, d'après les témoignages internet du BCSF) ;
- le **10 juillet 2023** à 16h28 heure locale, magnitude **M_{wp} 6,9**, profondeur 10 km, à environ 277 km au nord-est de Saint-Barthélemy (intensités probables moyennes de **I à II** d'après le communiqué B3 correspondant) ;
- le **1er septembre 2023** à 19h01 heure locale, magnitude **M_{Lv} 5,0**, profondeur 54 km, à environ 49 km au nord-est de Le Vauclin (intensités macrosismiques maximales de **IV à V**, d'après les témoignages internet du BCSF) ;
- le **28 novembre 2023** à 11h26 heure locale, magnitude **M_{Lv} 6,0**, profondeur 30 km, à environ 228 km au sud-est de Sainte-Anne (intensités macrosismiques maximales de **II** d'après les témoignages internet du BCSF) ;
- le **2 décembre 2023** à 04h48 heure locale, magnitude **M_{Lv} 6,0**, profondeur 24 km, à environ 50 km au nord de La Désirade (intensités macrosismiques maximales de **II à III** d'après les témoignages internet du BCSF) ;
- le **31 décembre 2023** à 07h31 heure locale, magnitude **M_{Lv} 5,1**, profondeur 30 km, à environ 88 km au nord-est de Sainte-Marie (intensités macrosismiques maximales de **III à IV**, d'après les témoignages internet du BCSF).

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 les séismes du 20 janvier et du 16 avril 2023 (zone du séisme de 2007). Le séisme du 10 juillet 2023 a quant à lui eu lieu dans la plaque océanique nord-américaine, avant son entrée en subduction (séisme « outer-rise »).

Pour comparaison, en 2022, 8 séismes tectoniques ont été ressentis en Martinique. Le plus fort, de **M_{Iv} 5,3**, a eu lieu le **15 février 2022** à 04h02 heure locale au large de la Guadeloupe, à environ 43 km de profondeur (*zone inter-plaque*).

Le **Tableau 12** 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, **9,2** séismes sont ressentis chaque année.

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**	**2012**	5	2	3	**10**
2001	2	1	1	**4**	**2013**	4	1	1	**6**
2002	4	2	-	**6**	**2014**	7	3	2	**12**
2003	3	2	1	**6**	**2015**	8	6	1	**15**
2004	9	-	2	**11**	**2016**	11	4	1	**16**
2005	3	1	3	**7**	**2017**	6	-	-	**6**
2006	6	1	4	**11**	**2018**	10	1	-	**11**
2007	8	7	-	**15**	**2019**	12	1	2	**15**
2008	7	-	2	**9**	**2020**	3	3	-	**6**
2009	7	-	1	**8**	**2021**	4	-	1	**5**
2010	6	3	2	**11**	**2022**	4	1	3	**8**
2011	8	1	-	**9**	**2023**	5	2	1	**8**

Tableau 12. 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 9,2 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 35**. 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.

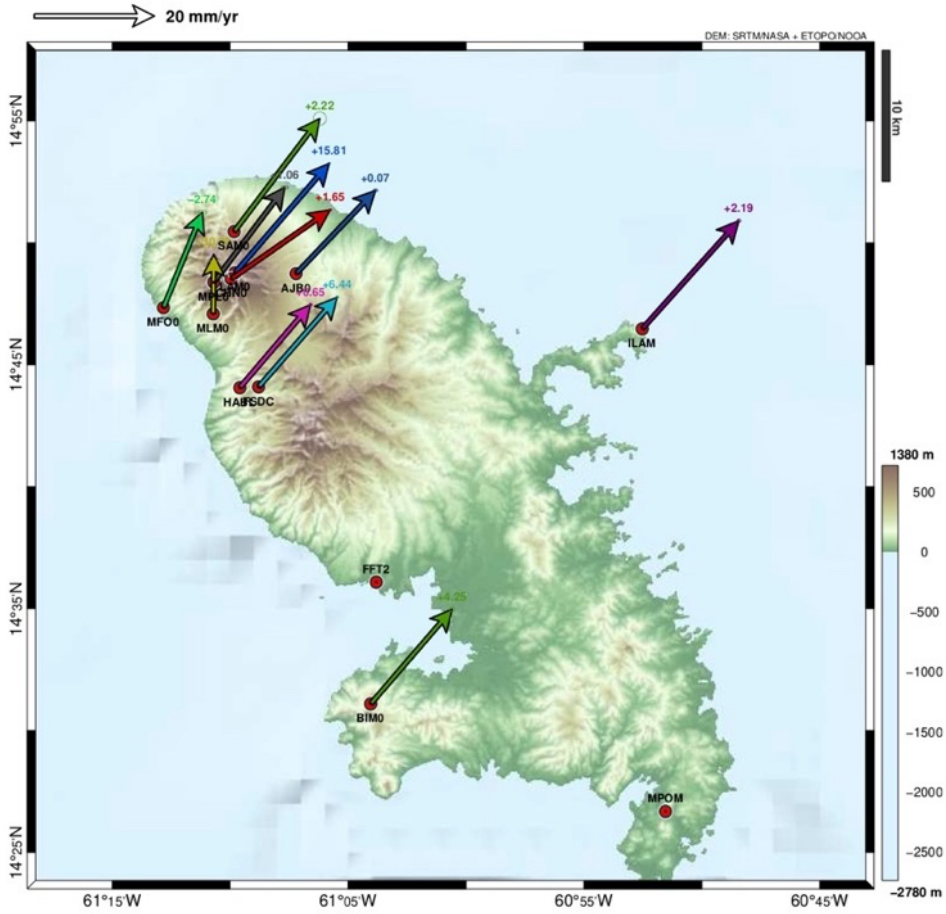


Figure 35. Vecteurs de déplacement calculés à partir des deux dernières années (2022 et 2023) de mesures du réseau GNSS de l'OVSM-IPGP. La taille des vecteurs représente la vitesse de déplacement en mm/an, et la flèche indique le sens du déplacement par rapport à la plaque Nord-Américaine (source WebObs/OVSM).

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/communiques-et-bulletins-de-lobservatoire

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

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 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 2023, tous réseaux confondus, le nombre de sites instrumentés de façon permanente et gérés par l'OVSM-IPGP s'élève à 40, certains sites accueillant plusieurs instruments. Ils sont répartis sur l'ensemble de la Martinique avec une densité plus importante autour de la Montagne Pelée. Le **Tableau 13** 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). Le **Tableau 14** donne le détail des capteurs présents sur les différents sites instrumentés et leur état de fonctionnement au 31 décembre 2023.

Réseau	Stations en 2022	Stations en 2023	En résumé
Sismologie	**1** Très Large-Bande **17** Large-Bande (dont 10 sur la Montagne Pelée) **1** Courte-Période Montagne Pelée (hors service) **1** Large-Bande Temporaire Montagne Pelée	**1** Très Large-Bande **17** Large-Bande (dont 10 sur la Montagne Pelée) **1** Courte-Période Montagne Pelée (hors service)	La station large-bande temporaire a été désinstallée (station AJB0).
Accélérométrie	**19** stations (dont 4 opérationnelles)	**19** stations (dont 3 opérationnelles)	La station du barrage de Manzo Bas est tombée en panne. Une campagne de modernisation des stations du réseau RAP a été entamée.
Déformation	**13** stations GNSS Permanentes (dont 7 Montagne Pelée) **1** stations GNSS Temporaire (sur la Montagne Pelée) **1** inclinomètre (hors service) **22** Points de Répétition	**14** Permanentes (dont 8 sur la Montagne Pelée) **1** inclinomètre (hors service) **22** Points de Répétition	La station GNSS temporaire est devenue une station permanente. L'inclinomètre de forage AJP ne fonctionne plus.
Géochimie	5 Points de mesures 1 Station continue	5 Points de mesures 1 Station continue	

Tableau 13. Récapitulatif de l'évolution des réseaux de surveillance de Martinique maintenus par l'OVSM-IPGP entre 2022 et 2023.

Sites instrumentés	Type de capteur et identifiant OVSM							
	SISMOLOGIE	GNSS	ACCÉLÉROMETRIE	GÉOPHONE	MÉTÉO	INCLINOMÉTRIE	PENDULES	GÉOCHIMIE
Morne Bigo Anse d'Arlet	BIM (WI)	BIM0	BIM					
Îlet Lapin Caravelle Martinique	ILAM (WI)	ILAM	ILAM					
Morne Pois Saint-Anne Martinique	MPOM (WI)	MPOM	MPOM					
Savane Anatole Martinique	SAM (WI)	SAM0	SAM					
Morne Lacroix	LAM (MQ)	LAM0			Multi capteurs			
Morne Lénard	MLM (MQ)	MLM0						
Morne Plumé	MPLM (MQ)	MPL0						
Source Chaude 2	SCH2 (MQ)	SCH2						
Morne Balais	BAM (MQ)							
Grand Bé	GBM (MQ)							
RI Julien	IA2 (MQ)							
Petit Bonhomme	PBO (MQ)							
FDFM Géoscope	FDFM (G)							
Morne Calebasse	PCM (MQ)							
Montagne du Vauclin	MVM (MQ)							
Morne La Pointe	LPM (MQ)							
Trois Ilets	TRM (MQ)							
Zone Aéro-Militaire	ZAM (MQ)		MAZM (RAP)					
Le Chinois		CHN0						
Morne Folie		MFO0						
Fond Saint-Denis		FSDC						
Habitation Blondel		HABL						
Ajoupa Bouillon		AJB0				IAJB0		
Forage Puits Chaud Continu								FPCC
Rivière Samperre				RPRE			RPRE	
Case Petit	CPM (MQ)			CPMA	Pluviomètre			
Case Conquérant				CCPA				
Bibliothèque Prêcheur				Centrale d'acquisition (BIBLIO)				
Collège de Basse-Pointe			CGBP (RAP)					
Barrage de Manzo (Haut)			CGMH (CTM)					
Barrage de Manzo (Bas)			CGMB (CTM)					
Lamentin			MALA (RAP)					
Météo Desaix			MAME (RAP)					
Piscine Carbet			CGCA (RAP)					
Hôpital Trinité			MATR (RAP)					
Sainte Marie			MASM (RAP)					
Diamant			MADI (RAP)					
Collège Diamant - Petite Lézarde			CGPL (RAP)					
EN COURS D'INSTALLATION								
Morne Macouba	MMA (MQ)							
Leiritz	LRIZ (MQ)	LRIZ						

Tableau 14. Récapitulatif des différents capteurs installés sur les sites instrumentés maintenus par l'OVSM-IPGP et état de leur fonctionnement au 31 décembre 2023 (vert : bon fonctionnement, orange : capteurs fonctionnels mais problème de transmission temps-réel des données, rouge : capteurs en panne).

Réseau sismologique régional des Petites Antilles

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 les ondes de volume qui traversent le globe terrestre et servent à étudier sa structure interne. On les appelle large-bande car ils détectent des ondes dans une plus grande bande de fréquence, celles émises par des séismes locaux comme grande distance.

À 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 36**). Depuis les années 1970, des échanges de données ont lieu entre les observatoires des îles françaises (aujourd'hui OVSM et OVSG) et le Seismic Research Centre (SRC-UWI) basé à Trinidad et Tobago. La technologie de transmission satellitaire VSAT permet depuis une quinzaine d'année des échanges temps-réel entre toutes les îles de la Caraïbe.

Grâce à un HUB VSAT de réception localisé à l'OVSM, les analystes de l'OVSM utilisent en temps réel les données transmises par voie satellitaire des stations de l'OVSG (réseau WI) et du SRC (réseau TR). Ces données sont complétées par les données

de 3 stations néerlandaises du KNMI (réseau **NA**) et de 3 stations de l'USGS (réseau **CU**) acquises par internet. L'ensemble de ces données est utilisé pour le travail de localisation de la sismicité régionale (**Figure 36**).

Les données de 2 stations sismologiques à transmission satellitaire basées en Martinique et appartenant au réseau **WI** (West-Indies) sont partagées en temps-réel par le même biais (**ILAM** et **BIM**), et contribuent à l'alerte montante du système de surveillance des tsunamis de la Caraïbe (SATCAR). La transmission des données de la station **SAM** a eu des interruptions en 2023 liées à des problèmes d'énergie puis de modem satellite. La station **MPOM** a été vandalisée en juillet 2021. Sa ré-installation est prévue en 2024.

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 l'étude de la terre profonde, notamment à l'aide des ondes générées par les séismes lointains appelés téléséismes). Les données sont accessibles à la communauté scientifique par Internet. Il contribue aussi au système d'alerte aux tsunamis de la Caraïbe (SATCAR).

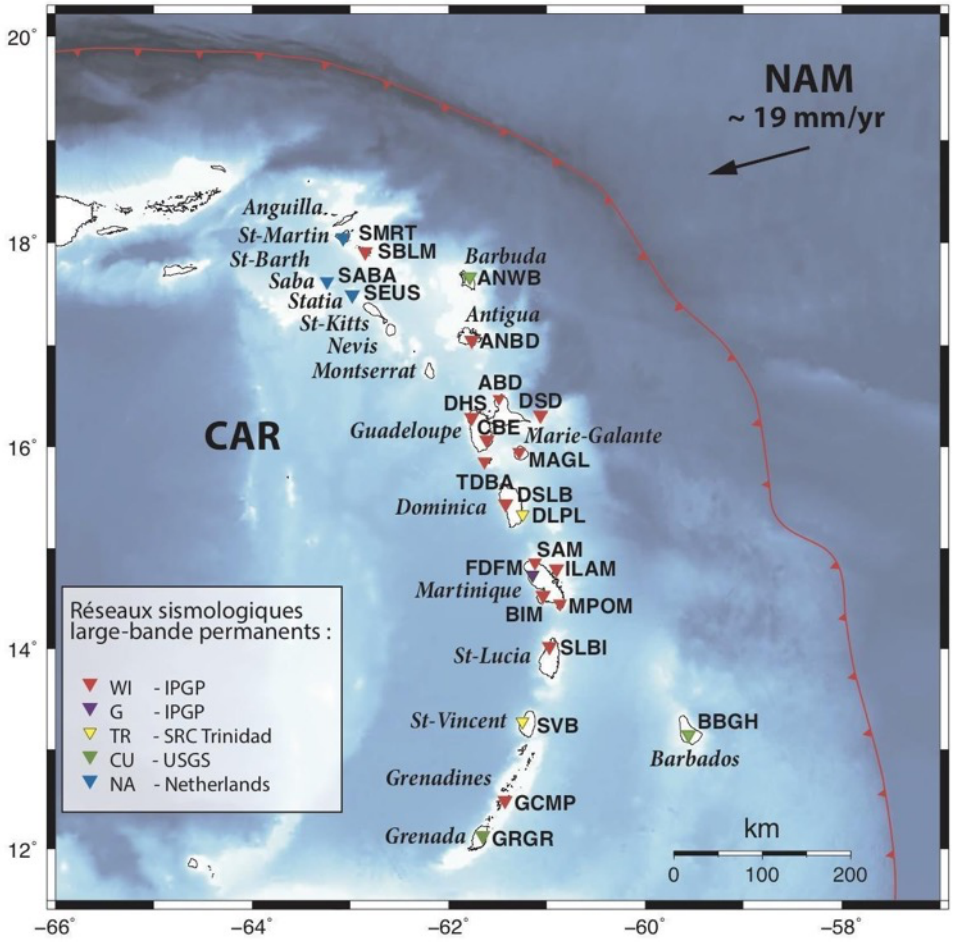


Figure 36. Localisations des stations sismologiques des réseaux régionaux permanents utilisés à l'OVSM-IPGP (WI, G, TR, CU et NA) pour la caractérisation de la sismicité régionale à l'échelle de l'arc des Petites Antilles. Source : J. Corbeau / OVSM-IPGP, modifié d'après Corbeau et al., 2021.

Réseau sismologique local

Présentation du réseau

Le réseau local de Martinique (**MQ**) est composé en 2023 de **14** stations sismologiques. Ces stations permettent la caractérisation de la sismicité locale (**Figure 36**) et viennent densifier les réseaux **WI** (**4** stations dont 2 fonctionnelles) et **G** (**1** station) décrits dans la section précédente pour la caractérisation de la sismicité régionale.

Sur le total des 19 stations opérées par l'OVSM-IPGP, 11 sont localisées au niveau de la Montagne Pelée et 8 stations sur le reste du territoire de la Martinique. 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. La technologie des sismomètres large-bande 3 composantes s'est développée et permet aujourd'hui de bénéficier de leurs avantages (meilleure sensibilité, enregistrement des 3 composantes du mouvement du sol, large bande passante) à un coût similaire à celui des courte-période.

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 de la Montagne Pelée 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 (actuellement hors service).
- En 2022, une nouvelle station numérique large-bande à 3 composantes est venue compléter le réseau (SCH2).
- En 2023, la station temporaire AJB0, après avoir rempli sa mission de caractérisation du site, a été désinstallée car le site n'a pas été retenu pour l'installation d'une station permanente.

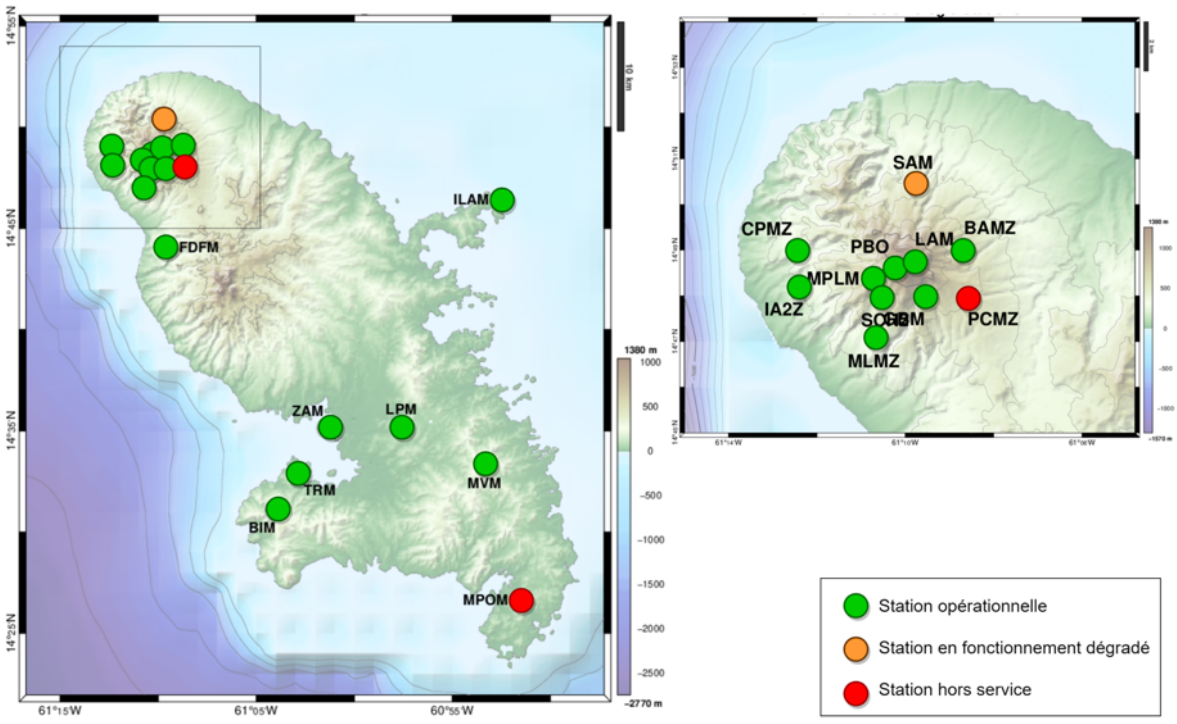


Figure 37. Réseau sismologique permanent de la Martinique (à gauche) et zoom sur la Montagne Pelée (à droite).

Interventions en 2023

Durant l'année 2023, les stations du réseau sismologique ayant nécessité des interventions sont :

- 2 stations ont vu leur capteur sismique tomber en panne, et un remplacement a été effectué (stations **LPM** et **ZAM**).
- 1 station a vu son capteur déréglé par une termitière qui s'était constituée dessus (station **GBM**). Cette station étant peu accessible, l'hélicoptère de la sécurité civile a dû être employé pour se rendre sur le site.
- 2 stations ont subi des pannes d'horloge. Toutes deux utilisaient les signaux GPS pour acquérir l'heure exacte. L'antenne GPS a été changée sur l'une d'elles (station **LAM**). L'autre station a été configurée pour récupérer l'heure exacte à l'Observatoire via son réseau de communication des données (station **BAM**).

L'infrastructure d'une nouvelle station sismique a été installée en Martinique (station **LRIZ**). Cette station, située sur le flanc nord de la Montagne Pelée, viendra compléter le maillage de stations sismiques au plus proche du volcan. Les instruments scientifiques sismologiques y seront installés en 2024.

Réseau accélérométrique

Présentation du réseau

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 les enjeux sont importants (conséquences sur les activités humaines et les populations) et donc là où le risque sismique est fort. 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 (**Figure 38**). L'OVSM-IPGP opère 4 accéléromètres au niveau des stations large-bande du réseau WI (SAM, ILAM, BIM, MPOM) et 8 stations (MADI, MALA, MAMA, MAME, MASM, MASP, MATR, MAZM) du Réseau Accélérométrique Permanent (RAP). L'OVSM-IPGP a également des conventions avec la Collectivité Territoriale de Martinique pour opérer 6 stations (CGCA, CGLR, CGCP, CGPL, CGMH, CGMB). Le collège de Basse-Pointe (CGBP) a été instrumenté par le Conseil Départemental de Martinique dans les années 2010 en partenariat avec le RAP. L'OVSM-IPGP apporte son expertise technique sur cette instrumentation et bénéficie des données en champs libre.

En 2023, 3 stations du réseau accélérométrique de la Martinique sont opérationnelles, 11 sont en fonctionnement avec une interruption des transmissions, 3 ont été démontées suite à des travaux sur site ou pour préparer leur mise à jour, 1 a été vandalisée et 1 est en panne. Les stations du réseau RAP utilisent une technologie obsolète (lignes téléphoniques RTC dont l'abandon par Orange a débuté en mai 2023 et concerne tout le territoire français) rendant difficile le maintien en état de la transmission de leurs données. Elles sont en cours de modernisation. Le **Tableau 15** recense les stations accélérométriques en fonction des réseaux auxquelles elles appartiennent.

Station	Réseau	Nombre de capteurs sur la station	État de fonctionnement
SAM	WI	1	Fonctionnement en mode dégradé
ILAM	WI	1	En service
BIM	WI	1	En service
MPOM	WI	1	Vandalisée
CGCA	CTM	1	Fonctionnement en mode dégradé
CGLR	CTM	1	Fonctionnement en mode dégradé
CGCP	CTM	1	Fonctionnement en mode dégradé
CGBP	CTM	13	En service
CGPL	CTM	1	Fonctionnement en mode dégradé
CGMH	CTM	1	Fonctionnement en mode dégradé
CGMB	CTM	1	Hors service
MADI	RAP	1	Fonctionnement en mode dégradé
MALA	RAP	1	Fonctionnement en mode dégradé
MAMA	RAP	1	Démontée pour travaux
MAME	RAP	1	Démontée pour travaux
MASM	RAP	1	Démontée pour travaux
MASP	RAP	1	Fonctionnement en mode dégradé
MATR	RAP	1	Fonctionnement en mode dégradé
MAZM	RAP	1	Fonctionnement en mode dégradé

Tableau 15. Stations accélérométriques de Martinique.

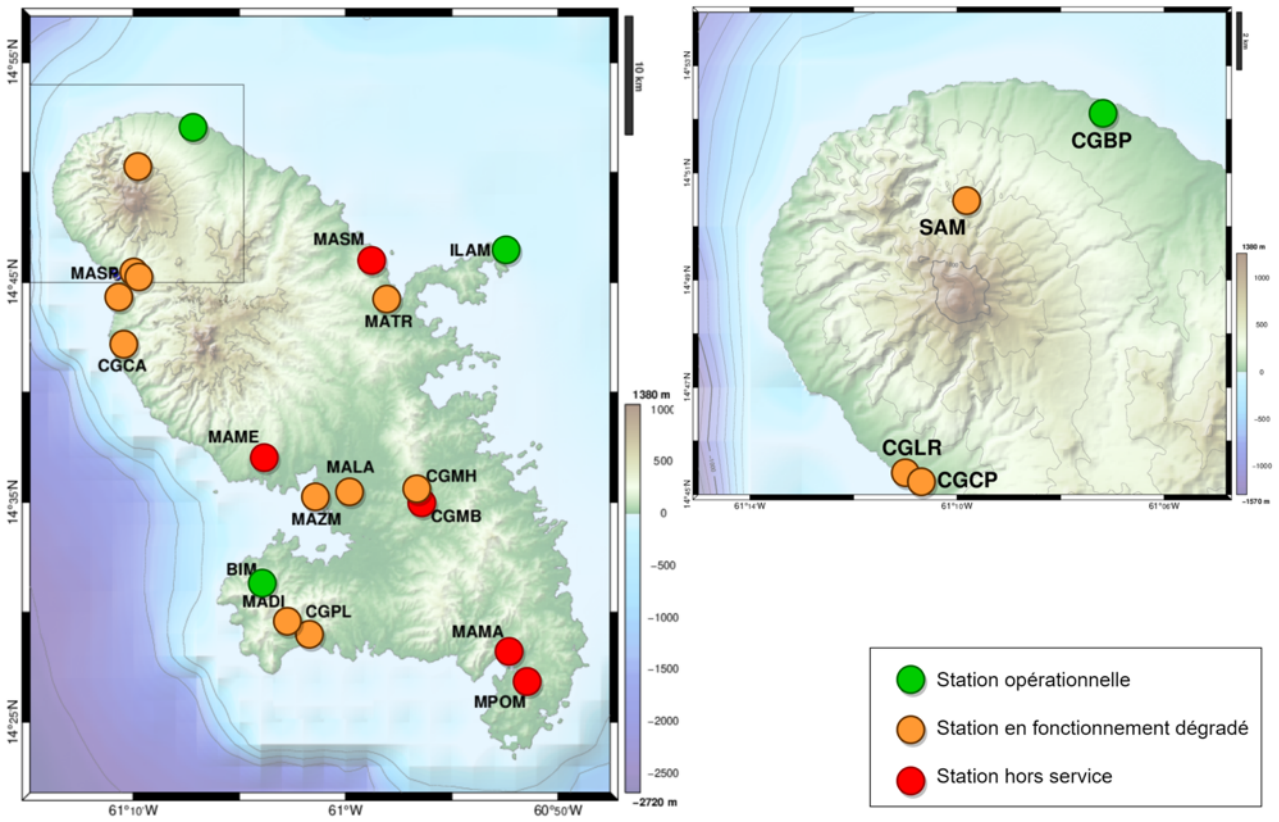


Figure 38. Réseau accélérométrique permanent de la Martinique (à gauche) et zoom sur la Montagne Pelée (à droite).

Interventions en 2023

Le collège de Basse-Pointe est instrumenté par 24 voies de mesure pour étudier ses déformations lors de séismes. Suite à l'envoi par le RAP d'une acquisition de remplacement d'occasion (modèle ne se fabriquant plus), l'OVSM a apporté son expertise technique pour son installation et sa remise en route en mai 2023. L'OVSM récupère les données des 3 composantes du capteur en champs libre pour la surveillance. L'ensemble des données du bâtiment est mise à disposition de la communauté scientifique par Epos-France.

Le renouvellement des stations du RAP a commencé par la conception et la fabrication d'une première station prototype en 2023 (station **MALA**), qui sert de modèle pour fabriquer à l'identique les autres stations (stations **MAME**, **MADI**, **MAMA**, **MASM**, **MASP**, **MATR** et **MAZM**). La seconde station à moderniser est déjà en cours de fabrication (station **MAME**). Les stations **MAME** et **MALA** ont donc bénéficié de plusieurs interventions pour analyser leurs problématiques locales d'installation et concevoir les solutions à mettre en œuvre.

Le barrage de La Manzo est suivi par deux stations accélérométriques, afin de suivre les déformations de l'ouvrage (stations **CGMH** et **CGMB**). Cette surveillance, sous la responsabilité de la CTM, est assurée par l'OVSM par le biais d'une convention. Ces deux stations sont tombées en panne en mai 2023. Seule la station **CGMH** a pu être remise en service, un manque de matériel de réparation empêchant la remise en service de la station **CGMB**. La CTM en charge de ces achats a reçu le matériel de rechange fin 2023, ce qui permettra une intervention début 2024. Il restera alors à remettre en service la liaison internet permettant la transmission en temps-réel des données à l'Observatoire.

Réseau de mesures des déformations du volcan

Présentation du réseau

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.

A l'OVSM-IPGP, les déformations sont mesurées grâce à un réseau GNSS (Global Navigation Satellite System) permanent (**Figure 39**) et un réseau GNSS de répétition. L'acquisition des inclinomètres de forage installés à Ajoupa Bouillon est défectueuse. 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 GipsyX du JPL/NASA.

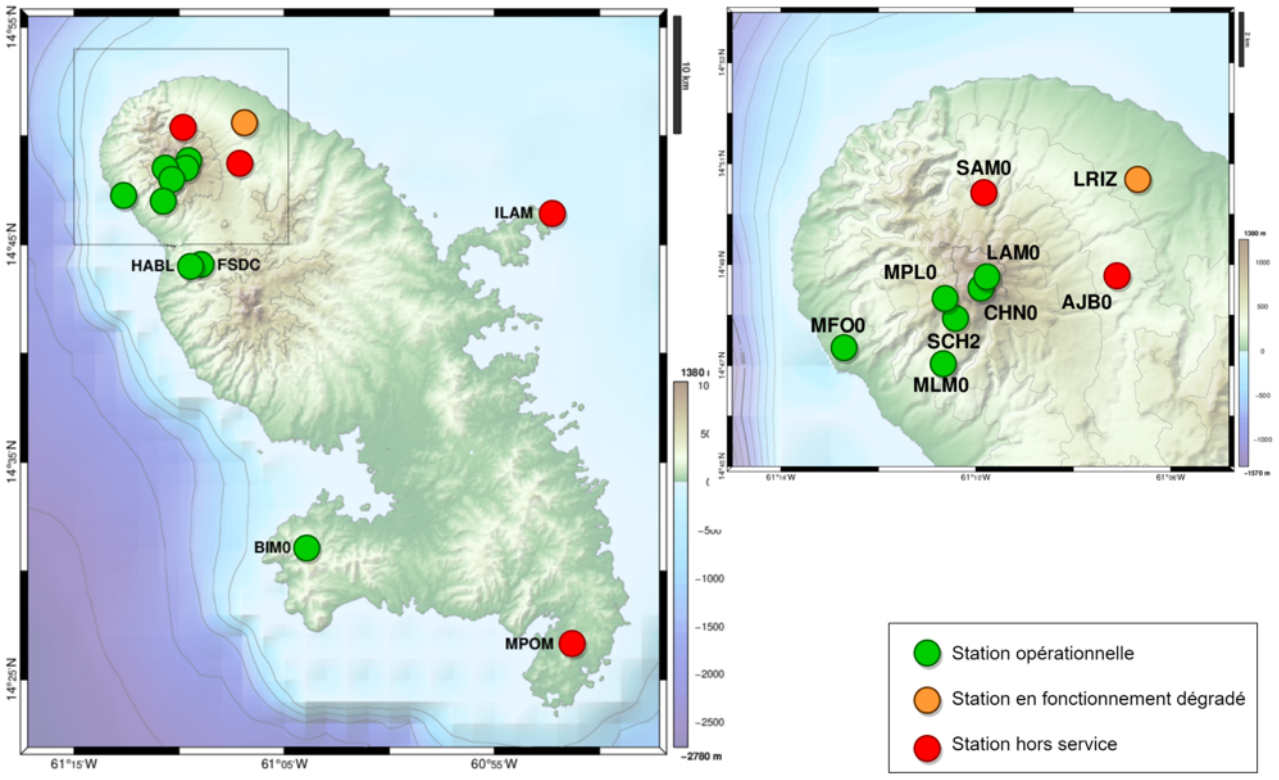


Figure 39. Réseau d'antennes GNSS permanentes de la Martinique (à gauche) et zoom sur la Montagne Pelée (à droite).

Interventions en 2023

En 2023, le réseau d'antennes GNSS a été particulièrement touché par des pannes indirectes touchant l'alimentation électrique et la communication des données (stations **BIM**, **SAM** et **AJB0**). Ces points seront abordés dans les sections suivantes.

Une station GNSS a vu ses données dégradées à cause de la végétation qui poussait autour (station **MFO**). L'analyse des données ne peut révéler ce genre de problèmes que par traitement ultérieur des données. C'est pourquoi les campagnes d'élagages doivent être menées fréquemment, afin d'anticiper ce genre de problème.

Un seul récepteur GNSS est tombé en panne (station **SAM**). Cette station ne transmettait plus ses données en temps réel depuis juillet 2022, et nécessitait d'aller les récupérer sur le terrain. Un récepteur sera tout de même réinstallé début 2024 pour remplacer celui en panne pour continuer à acquérir les données. Le récepteur défectueux est en cours de réparation.

La station GNSS de **ILAM** fonctionnait de façon discontinue avec des trous dans les données jusqu'à début 2023. À la suite du déménagement de la parabole satellite de l'ancien au nouvel observatoire (HUB de réception VSAT) et de la redirection de toutes les transmission VSAT via le hub de l'OVSG en Guadeloupe, les données n'ont plus été transmises automatiquement à l'OVSM.

L'un des points de mesure temporaire a été instrumenté pour devenir un point de mesure permanent (station **LRIZ**). Cette station, située sur le flanc nord de la Montagne Pelée, vient compléter le maillage de stations GNSS au plus proche du volcan.

Réseau de surveillance des paramètres géochimiques

Présentation du réseau

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).

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 a 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.

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 mètres a été creusé et instrumenté pour des mesures continues de la température, du pH, de la conductivité et de la hauteur d'eau. La station continue désignée par le site FPCC transmet en temps réel ses données à l'observatoire.

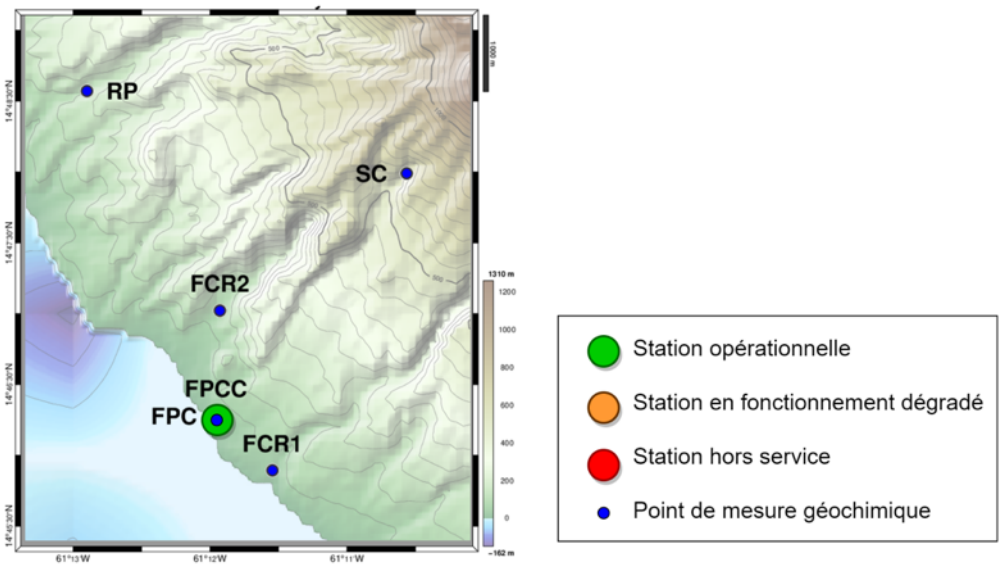


Figure 40. Points de mesures géochimiques permanents de la Martinique.

Interventions en 2023

La station de géochimie permanente a parfaitement fonctionné durant l'année 2023. Une opération d'élagage a été menée pour entretenir le site.

Réseau de surveillance de la rivière du Prêcheur

Présentation du réseau

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) (**Figure 41**). L'ensemble de ces données étant traité par une centrale d'acquisition à la Bibliothèque du Prêcheur (BIBLIO).

Une première version du système d'alerte a été installée 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. Suite aux épisodes de lahar de 2018 ayant endommagé le système initial, de nouvelles acquisitions, transmissions et capteurs ont été installés en 2019, financés par la mairie du Prêcheur.

Actuellement le système de surveillance de la rivière du Prêcheur n'est pas en pleine possession de ses capacités. Moyennant l'entretien régulier de la végétation sur la station en amont de la confluence entre la rivière du Prêcheur et la rivière Samperre (station RPRE), le système de détection des lahars fonctionne sur la base des signaux AFM des 3 stations. Certains des capteurs de mouvement sur les pendules sont actuellement à remplacer, cette partie du système, agissant en secours du mode principal de surveillance au passage d'un lahar très puissant n'est donc pas pleinement opérationnelle.

Le maintien en conditions opérationnelles de la station RPRE (pendules et géophones) est difficile à cause de sa difficulté d'accès et de la dangerosité de son entretien. Cette station est située en hauteur, au pied d'une falaise et le travail d'entretien nécessite le soutien de spécialistes des travaux en hauteur. L'accès depuis la Rivière est en général impossible car il n'est pas possible d'y maintenir une ligne de vie pour monter sur le site de la station. L'accès se fait donc essentiellement par hélicoptère.

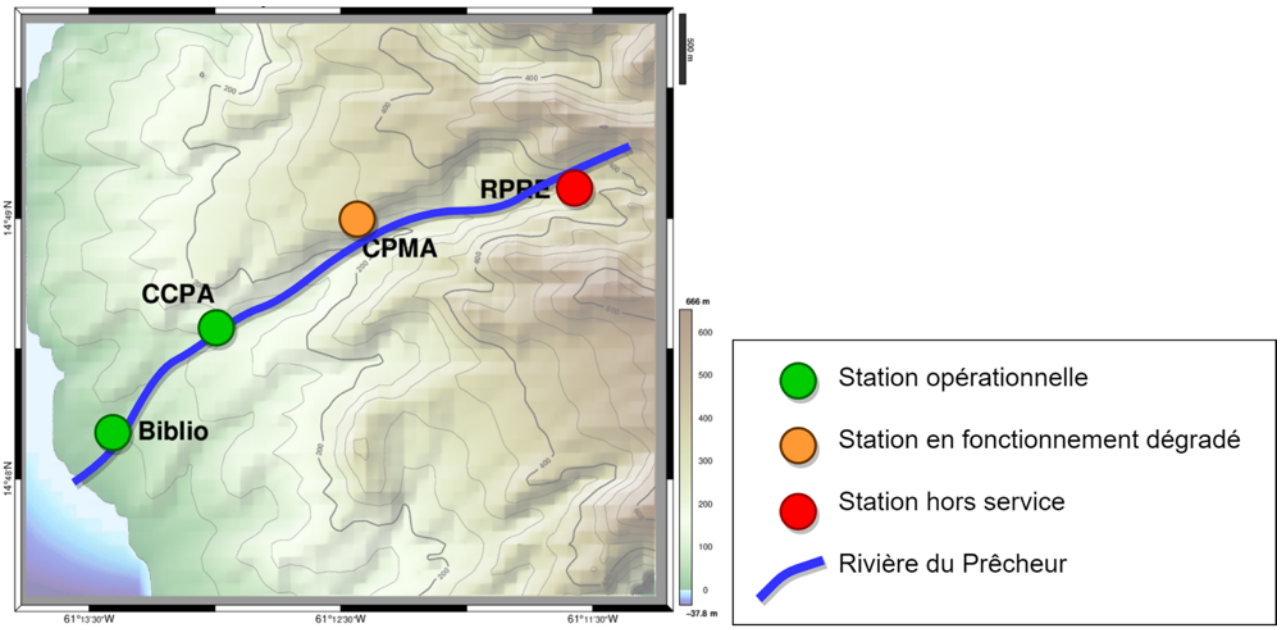


Figure 41. Réseau de surveillance de la rivière du Prêcheur.

Interventions en 2023

La pousse de la végétation est le principal problème qui touche les stations de surveillance de la rivière du Prêcheur. Une campagne d'élagage a été réalisée sur la station **CCPA**, dont l'alimentation électrique et la transmission des données étaient impactées par la hauteur des arbres environnants.

La station **RPRE**, très en amont sur la rivière, a été élaguée par l'entreprise CAN, déposée sur place par l'hélicoptère de la Sécurité Civile. Cependant la falaise au-dessus de la station présente des instabilités, qui sont d'autant plus fragilisés par le souffle de l'hélicoptère. Ces instabilités mettent en danger les équipes sur place. Une purge de cette zone est à prévoir pour assurer la sécurité du personnel et de la station.

Réseau de communication des données de stations

Le réseau VSAT

Quatre stations utilisent une communication par satellite pour transmettre leurs données (stations SAM, MPOM, ILAM et BIM). Ce sont des stations dite VSAT. L'Observatoire dispose de sa propre antenne satellite pour recevoir les données.

Le HUB de réception de l'Observatoire a été déménagé de l'ancien au nouvel observatoire en avril 2023. L'antenne d'une taille conséquente ainsi que son radôme ont nécessité l'emploi d'une grue ainsi que l'aide d'agents de Paris et de Guadeloupe. À la suite de ce déménagement, des travaux d'œuvre légers ont été nécessaires pour finaliser l'installation. Malheureusement certains organes électroniques sont tombés en panne et seule la partie réception de l'antenne a pu être remise en service. Ces travaux de remise en service et de diagnostics de pannes ont impliqué toute l'équipe technique de l'OVSM, avec l'aide à distance des équipes de Paris et de Guadeloupe.

Deux des stations VSAT ne sont pas pleinement opérationnelles à la date de rédaction de ce rapport (stations **MPOM** et **SAM**). La station **MPOM**, lourdement vandalisée en 2021, n'a pas encore pu être réinstallée. Entre-temps le dalle de béton de sa cave sismique s'est affaissée, ce qui alourdira les travaux de réhabilitation. La station **SAM** quant à elle souffrait d'une panne de sa centrale électrique solaire. La moitié de cette centrale a été réhabilitée pour assurer l'acquisition des données scientifiques, mais l'ensemble de la centrale reste nécessaire pour alimenter l'antenne satellite. La réhabilitation de cette station est prévue en 2024 avec l'achat de composants de rechange pour certains éléments de transmission.

Suite à un défaut sur le paratonnerre du pylône de TDF, la station **BIM** a subi deux foudroiements en septembre et octobre 2023. Les deux foudroiements ont détruit successivement le matériel installé d'origine puis son remplacement. L'OVSM a donc dû utiliser en troisième lieu du matériel démonté de la station **MPOM** suite à sa vandalisation. La remise en service de cette station était d'autant plus prioritaire qu'elle sert de nœud de communication pour quatre stations du sud de la Martinique (stations MVM, LPM, ZAM et TRM). Ce sont en tout neuf interventions qui ont déjà été menées pour rétablir la situation, sachant que d'autres interventions sont encore à venir. L'OVSM a ainsi été privée des données en temps réel des cinq stations du sud pendant deux mois. La récupération de ces données sur le terrain est en cours.

Le réseau

La transmission des données entre les stations et l'OVSM passe entre autres par un réseau de communication sans fil, constitué de liaison WIFI (2,4GHz et 5GHz), de liaison HF (VHZ, UHF) et par des modems mobiles. Un certain nombre d'opérations ont été menées en 2023 pour adapter ce réseau de communication aux nouvelles configurations du réseau. L'observatoire a dû installer une baie réseau sous le bâtiment pour connecter les bornes WIFI et HZ qui pointent vers la montagne Pelée. Un switch POE avec la norme constructeur Ubiquiti a été installé dans cette baie avec un connexion par fibre pour se protéger des surtensions électriques induites par la foudre.

Le déménagement de l'ancien au nouvel observatoire a nécessité le déplacement d'antennes. La liaison internet, qui passait par l'ancien observatoire pour rejoindre Morne-Folie, passe maintenant directement du nouvel observatoire au Morne-Folie sans intermédiaire. L'ancien observatoire reste tout de même un nœud de communication important pour les stations de la Montagne Pelée. Quatre stations l'utilisent comme point relais (stations MPLM, PBO, MLM et LAM), sachant que le site accueille lui-même une cinquième station (station GNSS FSDC). Afin de rendre ce site indépendant du réseau électrique, une installation à énergie solaire y a été installée.

Le firewall de l'observatoire n'est plus maintenu par le constructeur. Ce firewall est pièce maîtresse du réseau car il gère le routage, le routage inter VLAN de l'observatoire et sert de serveur DHCP. L'observatoire a acheté un nouveau firewall avec la même configuration haute disponibilité redondante qui sera remplacée courant 2024.

Une autre technologie employée pour la transmission des données sans fil est l'utilisation de modems 4G. À la fin 2023, une seule station utilisait cette technologie (la station **AJB0**), mais de nombreuses pannes du modem ont impacté la transmission des données de cette station. Trois stations installées (**LRIZ** et **MALA**) ou en cours d'installation (**MAME**) utiliseront cette technologie en 2024 pour transmettre leurs données.

Alimentation électrique des stations

Deux centrales solaires ont été installées sur le réseau de l'OVSM en 2023. La première, évoquée plus haut, se situe à l'ancien observatoire. À terme, cette centrale alimentera la station de l'ancien observatoire (station FSDC) ainsi que le nœud de communication de quatre stations de la Montagne Pelée. Actuellement les antennes restent alimentées par le secteur et seule l'acquisition des données de FSDC est sur panneaux solaires. Le matériel est en place mais une configuration informatique reste à effectuer pour finaliser le passage au solaire. Cette configuration est dépendante du déménagement des serveurs de l'OVSM, dont certains se situent encore à l'ancien observatoire.

La deuxième centrale solaire installée se situe à Morne Plumé (station MPLM). Pour supporter les projets d'installation de nouveaux appareils de surveillance (caméra vers la falaise Samperre) dont les données doivent être relayées par ce site, il était nécessaire d'installation un apport d'énergie supplémentaire. L'acheminement du matériel a été effectué par l'hélicoptère de la Sécurité Civile et les agents de l'OVSM ont monté la centrale sur place.

Il faut également évoquer la station Leyritz (LRIZ), qui a été montée cette année et qui accueille donc une troisième centrale solaire neuve, bien qu'il s'agisse là d'une centrale moins conséquente que les deux précédemment évoquées.

Les installations solaires de ces stations s'appuient sur des batteries au plomb pour stocker leur énergie. Pour les stations uniquement accessibles à pied, les batteries sont choisies avec une capacité limitée pour qu'elles puissent être portées à dos d'homme. Cela a été en partie le cas pour la station PBO, la batterie neuve ayant été déposée par l'hélicoptère de la sécurité civile et la batterie défectueuse redescendue à pied. La station LAM, au niveau de la caldeira héberge plusieurs instruments et nécessite une alimentation conséquente. Elle contient actuellement 263 kg de batteries usagées (pour 161 kg de batteries en service). D'autres installations de batteries ont eu lieu en 2023 mais sur des stations accessibles par la route, rendant la manutention du matériel plus aisée (stations BIM, FSDC et LRIZ).

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 2023, l'observatoire a acquis un total d'environ **350 Go** de nouvelles données sismologiques. À ces données brutes, il faut rajouter un produit sismologique : le catalogue sismique validé en temps-réel, dont le BCSF-ReNaSS affiche le contenu sur son site grand public. Les données de géodésie sont archivées et distribuées dans les standards de la communauté géodésique. En 2023, l'OVSM a acquis plus de **4 Go** de données GNSS. Depuis 2022, ces données brutes sont distribuées via le noeud GLASS IPGP hébergé et opéré par le centre de données de l'IPGP. Grace à la visibilité offerte par cette nouvelle infrastructure de distribution des données GNSS développée par le groupe GNSS dans le cadre d'EPOS, les statistiques d'utilisation des données GNSS de l'OVSM et des observatoires volcanologiques de l'IPGP ont été multipliées par 5 en 2023.
En 2023, le portail EPOS a été officiellement ouvert au public. Par le biais de ce portail européen, les données brutes des stations sismiques et géodésiques ainsi que les catalogues de sismicité de l'OVSM sont disponibles par le biais de webservices aux standards des communautés concernées.
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. En 2023, les données des années 2020 à 2022 ont été à leur tour validées. Ces deux catalogues validés sont distribués via l'entrepôt de données hébergé et géré par le centre de données de l'IPGP, dans la collection dédiée à l'OVSM.

Infrastructures, bâtiments et véhicules

Électricité

Le maintien opérationnel de l'énergie électrique dans le nouvel observatoire est fonctionnel via la maintenance annuelle du groupe électrogène (neuf interventions de maintenance préventive).

L'observatoire a choisi de remplacer son onduleur vieillissant de la salle informatique équipée de quatre baies contenant les clusters informatiques, les baies de stockage et les modems satellites. Pour cela, l'observatoire a publié un marché à procédure adaptée et a retenu une offre. Cet onduleur sera installé courant 2024.

Climatisation

Le rez-de-chaussée (étage des bureaux) n'était plus climatisé depuis une panne générale. Des travaux pour le remplacement des équipements de climatisation ont eu lieu du 31 août 2023 au 15 décembre 2023 par l'entreprise Clim Service missionnée par les services de la CTM (voir **Figure 42**). La dalle de béton destinée à accueillir les compresseurs avait été réalisée en août 2022.

Figure 42. Travaux de rénovation du système de climatisation de l'OVSM.

Étanchéité

Depuis la mise à disposition du nouveau bâtiment en mars 2019, l'observatoire fait face à de nombreuses infiltrations d'eau dans des pièces stratégiques devant accueillir initialement les serveurs d'acquisition et d'autres équipements alimentés électriquement, ainsi que dans certains bureau, atelier, cuisine et cafétéria.

La CTM a ordonné plusieurs visites d'expertise en 2023 et un calendrier d'interventions doit être programmé début 2024. En attendant, l'OVSM a pris la responsabilité de mettre en place des mesures temporaires d'urgence (recouvrement des principales entrées d'eau sur la plateforme supérieure par des bâches), afin de permettre la réintégration des locaux et limiter les conséquences des infiltrations dans les bureaux notamment (dégradation des plafonds et cloisons intérieures).

Incidents

Incendie du 18 mai 2023

Un incendie s'est déclaré le 18 mai 2023 sur des parcelles agricoles jouxtant celle de l'OVSM. Le feu s'est propagé pendant plusieurs heures sur le flanc Nord et Ouest du Morne la Rosette pénétrant à plusieurs endroits l'espace vert du site jusqu'à venir encercler le bâtiment de l'OVSM-IPGP, propriété de la CTM. Le front de flammes a été proximité immédiate des installations scientifiques de surveillance et des bâtiments de l'OVSM-IPGP, et potentiellement menaçant pour le personnel s'il avait été présent (absents car jour férié). Ce sont 11 engins du STIS qui sont intervenus ainsi que l'hélicoptère de la sécurité civile Dragon 972 pour une reconnaissance aérienne. Une plainte à la Gendarmerie de Saint-Pierre a été déposée le 20 mai 2023.

Figure 43. Incendie du 18 mai 2023 : vue du dispositif d'intervention des pompiers (caserne de Saint-Pierre, Case Pilote, Schoelcher, Gros Morne, le feu ayant atteint une distance de 3 m de la cave sismique GEOSCOPE, de la salle des serveurs informatiques et des données de surveillance (à droite) et >5 m derrière le radôme (blanc) de l'antenne VSAT (surveillance volcan, séisme, alerte tsunami SATCAR-UNESCO), vue vers le nord, (photos OVSM-IPGP).

Désordres dans la structure du bâtiment

Nous faisons ci-dessous, un résumé factuel des différentes actions menées lors des événements particuliers liés à la structure du bâtiment, qui ont nécessité l'évacuation du bâtiment durant 5 mois.

24/07/2023	**13h30 :** enregistrement d'un événement sismique particulier ressenti par plusieurs personnes à l'intérieur du bâtiment (RDC & RDJ). Le signal est enregistré uniquement par une station sismologique située sur le site de l'observatoire (FDFM). **14h28 :** second événement plus fort qui a été ressenti dans le bâtiment par toute l'équipe présente. Évacuation du bâtiment (personnel OVSM et ouvriers présents pour travaux de climatisation). **18h00 :** inspection de l'intérieur et de l'extérieur du bâtiment par le personnel de la CTM accompagné d'un inspecteur de l'APAVE. Recommandation à la CTM de missionner un géomètre pour mesurer le déplacement du bâtiment et le suivre sur plusieurs semaines.
25/07/2023	Passage du personnel de la CTM dont un spécialiste des mouvements du sol. Constatation des problèmes d'étanchéité du bâtiment (sous l'observatoire, locaux bâtiment principal, garages et ateliers).
26/07/2023	Visite d'expertise de l'APAVE sur la structure métallique et recommandation de ne pas accéder au bâtiment.
28/07/2023	Mise en place d'un soutien des psychologues du travail pour faire face à la situation. Réunion d'équipe pour la réorganisation des postes de travail au RDJ (délocalisation des bureaux dans les studios).
31/07/2023	Pré-rapport de l'APAVE rendu à la CTM. Constat visuel par la CTM à l'intérieur et à l'extérieur du bâtiment, établissement d'un calendrier prévisionnel d'intervention. Information de la préfecture et des mairies de Saint-Pierre et du Prêcheur.
03/08/2023	Rencontre du personnel de la CTM, de l'APAVE, de Castel et Fromaget, du cabinet de géomètre expert Onfray, Clausse et Associés. Le cabinet de géomètre a été chargé par la CTM d'effectuer des mesures sur le bâtiment et le terrain environnant pour mettre en évidence et suivre des déplacements éventuels. Déclaration de sinistre auprès de l'assureur (MAIF).
08/08/2023	Relevé des dimensions des pièces à faire fabriquer.
14/08/2023	Rencontre du personnel de la CTM, de Castel et Fromaget et d'un expert mandaté par l'assureur (garantie décennale) de Castel et Fromaget pour pour rappeler la chronologie des événements.
18/08/2023	Pose des repères et des cibles sur et autour du bâtiment pour la première campagne de mesure par les géomètres du cabinet Onfray.
06/09/2023	Réception du courrier du Président de la CTM concernant l'interdiction d'accéder au bâtiment (courrier daté du 16/08/2023).
31/10/2023	Visite d'un huissier mandaté par la CTM pour constat des nouveaux désordres et fuites d'eau.
09/11/2023	Expertise sur site des nouveaux désordres signalés par l'observatoire (APAVE & CTM).
22/12/2023	Réception d'un courrier de la CTM autorisant le retour du personnel de l'OVSM dans le bâtiment et indiquant la liste des différents travaux d'étanchéité qui vont être menés.
26/12/2023	Début de la réintégration du personnel de l'observatoire dans le bâtiment.

Véhicules

La gestion du parc de véhicules automobiles de l'observatoire est maintenue en réalisant les interventions d'entretien habituelles (révision, pneumatiques, géométrie du train avant, etc.). Deux opérations de maintenance particulières sont à signaler en 2023 :

- Le véhicule tout-terrain Ford Ranger a connu une panne importante au début du mois d'août (présence d'eau dans le circuit de carburant), suivie d'une fuite d'huile due à la réparation en concession entraînant l'immobilisation du véhicule pendant quatre mois. Un véhicule tout-terrain (simple cabine) a donc été loué courant octobre pour les besoins d'interventions techniques sur les sites difficiles d'accès nécessitant un véhicule adapté.
- Le véhicule utilitaire Peugeot Partner a vu sa carte pétrolière optimisée permettant l'achat de liquide favorisant la réduction des émissions de gaz à l'échappement (AdBlue). Suite à l'apparition d'un code défaut (niveau AdBlue) au tableau de bord risquant l'immobilisation du véhicule, le réservoir AdBlue a été remplacé en novembre 2023.

Ancien observatoire du Morne des Cadets

Les clés du bâtiment de l'Observatoire du Morne des Cadets ont définitivement été remises à la CTM le 16 juin 2023, marquant la fin de l'occupation de ce bâtiment par le personnel de l'OVSM-IPGP. Le bâtiment continue cependant à héberger une station de mesure GNSS des déformations et des antennes de transmission sur son toit, dont l'alimentation a été rendue autonome par panneaux solaires.

L'OVSM est également impliqué en tant que conseiller scientifique dans le projet de muséographie mené par la CTM.

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 2023 :

- le **16 mars 2023** : utilisation du logiciel Etamine du CNRS (S. Phemius) ;
- les **28 et 29 mars 2023** : formation initiale Sauveteur Secouriste du Travail (J. Corbeau, C. Vidal, I. Fernandez, A. Andrieu, D. Melezan) avec l'entreprise ERGODOM ;
- les **19 et 20 avril 2023** : formation initiale Sauveteur Secouriste du Travail (J-M. Lavenaire, F. Jadelus, J-G. Gabriel, S. Phemius, A. Jalta, V. Minin) avec l'entreprise ERGODOM ;
- le **5 juin 2023** : formation d'habilitation électrique de niveau B0-H0,H0v avec l'APAVE (V. Minin) ;
- le **13 et 14 novembre 2023** : formation du Groupe d'Intervention Macrosismique de niveau 2 en Guadeloupe organisée par le BCSF (J. Corbeau, D.Melezan, F.Jadelus) ;
- entre **avril et novembre 2023** : formation bureautique de la CNFPT à la CTM (V.Minin).

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 3 janvier au 31 janvier 2023 :** Cyril AUBAUD (IPGP, finalisation de l'installation du laboratoire de géochimie de l'OVSM) ;
- **le 18 Janvier 2023** : Johan VILLENEUVE (CNRS, rencontre de l'équipe) ;
- **du 12 janvier au 01 mars 2023 :** François BEAUDUCEL (IPGP, direction par intérim) ;
- **du 28 février au 24 mars 2023 :** Guillaume CARAZZO (IPGP, direction par intérim) ;
- **du 11 au 24 mars 2023 :** Jean-Christophe KOMOROWSKI (IPGP, direction par intérim) ;
- **du 11 au 25 mars 2023**, puis **du 3 au 10 avril 2023 :** Jean- Marie SAUREL (IPGP, déménagement du hub VSAT) ;
- **du 14 mai au 17 juillet 2023** : Jean-Christophe Komorowski (IPGP, direction par intérim) ;
- **du 18 juin au 18 août 2023** : Jérôme VERGNE (EOST, rencontre de l'équipe et travaux de sismologie) ;
- **du 19 au 21 juin 2023 :** Carole BERTHOD (OVSG-IPGP) ;
- **du 25 juin au 02 juillet 2023 :** Karen PASCAL (SRC Montserrat, participation à la conférence de Saint-Pierre) ;
- **du 06 juillet au 29 août 2023 :** Cyril AUBAUD (IPGP, direction par intérim) ;
- **du 24 au 28 juillet 2023 :** Camille BOUVARD et Ted LUC (IPGP, test du sismomètre de fond de mer) ;
- **du 3 septembre au 13 octobre 2023 :** Jean-Bernard DE CHABALIER (IPGP, direction par intérim) ;
- **du 28 octobre au 24 janvier 2024 :** François BEAUDUCEL (IPGP, direction par intérim) ;
- **du 14 au 15 novembre 2023 :** Sylvain CARRE (CEA, visite annuelle de la station de Sainte-Anne) ;
- **du 29 novembre au 01 décembre 2023 :** Jan VERLIN, David DUMOULIN-KERVAN, Florence IHADDADENE, Catherine RANNOU (projet ANR SciOUTPOST).

Stagiaires

Six étudiants ont été accueillis en stage à l'observatoire, tous cursus confondus :

- **du 2 au 31 janvier 2023** : Jade Harmonie AUGER, L3 de Physique, Université de Poitiers, encadrée par A. Andrieu et J. Corbeau ;
- **du 3 au 10 février 2023** : Medarlyne Michaud, L3 de Chimie, Université Lille Artois, encadrée par F. Jadelus et C. Aubaud *;*
- **du 6 au 10 février 2023** : Jérémy Calleau, Isac Djoudar et Grandjean Zoé, Stagiaires de 3ème, encadrés par A. Andrieu, C. Vidal, F. Jadelus, J. Corbeau, D. Melezan et S. Phemius *;*
- **du 3 au 31 juillet 2023** : Erine Antoine, 3ème année d'école Ingénieur – Institut polytechnique Unilasalle Beauvais, encadrée par J. Corbeau.
- **du 25 mars au 3 avril :** Stage *Volcano Observatory field trip*, encadré par J-C Komorowski, G. Carazzo et l'équipe de l'OVSM de 10 étudiants de Master M1 et M2 pour un cours sur le terrain, StepUp, IPGP Université Paris Cité.

Hygiène et sécurité

Les personnels de l'observatoire ont effectué leur visite périodique auprès de la médecine du travail durant les mois de septembre et novembre 2023.

La Collectivité Territoriale de la Martinique (CTM) a assuré la continuité des interventions d'entretien et de nettoyage avec le remplacement de l'agent d'entretien du bâtiment de l'OVSM durant la période estivale (juin-juillet 2023). Le maintien du plan de prévention et de lutte contre les nuisibles s'est poursuivi en 2023 avec 4 interventions de dératisation et de désinsectisation dans l'enceinte du bâtiment.

L'OVSM a procédé à la désactivation de l'alarme anti-intrusion le 31 juillet 2023, pour pallier aux déclenchements intempestifs sachant que le bâtiment principal était inoccupé.

La signalétique « eau non potable » sur les trois points d'eau extérieurs de l'observatoire (garage, extérieur RDJ et deck RDJ en face de la cuisine) a été mise en place.

Relations avec les autorités

Révisions des plans ORSEC

L'OVSM est régulièrement sollicité par le Service Interministériel de Défense et de Protection Civiles (S.I.D.P.C) de la Martinique pour l'organisation et la participation aux différents exercices de crises et pour la mise à jour des plans ORSEC. Ces exercices permettent notamment de vérifier la pertinence des plans ORSEC, des procédures, et d'évaluer les équipes et les moyens mis en œuvre pour répondre aux crises telluriques (séismes, volcans, tsunamis).

En septembre 2023, le plan ORSEC Volcan a été modifié : une proposition de mise à jour de l'échelle des niveaux d'alertes a été faite par l'OVSM et a été validée par la préfecture.

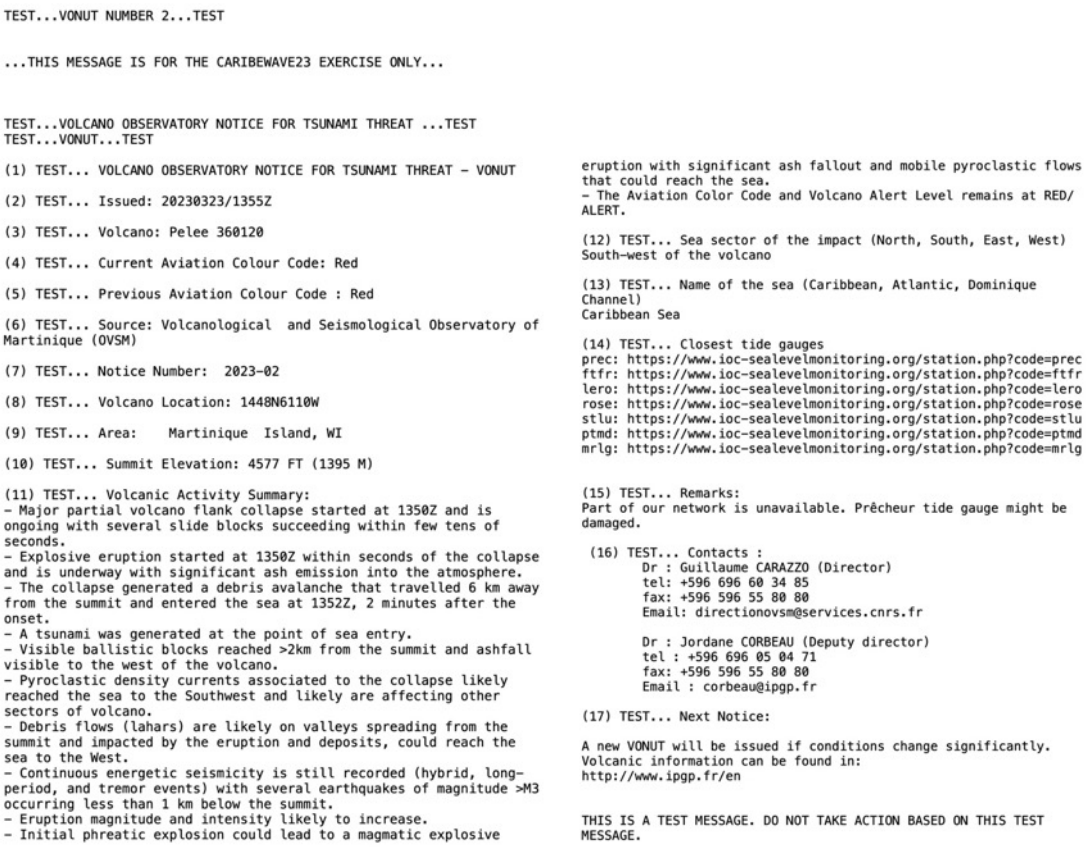
Le plan ORSEC Séismes a été mis à jour au cours de l'année 2023. L'OVSM a été sollicité pour participer à la rédaction du contexte sismo-tectonique des Petites Antilles et de la définition de l'aléa sismique de la région. Le plan a été validé en octobre 2023 et testé lors de l'exercice NOVI du 19 octobre 2023.

Participation à l'exercice CARIBWAVE

Comme chaque année depuis 2011, l'OVSM-IPGP a participé activement à l'exercice Caribe Wave du 23 mars 2023, destiné la préparation aux tsunamis dans la Caraïbe et les régions adjacentes. Organisé par le Groupe Intergouvernemental de Coordination pour le Système d'Alerte aux Tsunamis et Autres Risques Côtiers pour les Caraïbes (ICG/CARIBE-EWS) de la Commission Océanographique Intergouvernementale (IOC) de l'UNESCO, l'exercice 2023 a consisté à simuler un tsunami produit par l'effondrement d'une partie du flanc de la Montagne Pelée dont les dépôts atteignent la mer des Caraïbes.

L'équipe de l'OVSM-IPGP a participé au comité de pilotage de l'exercice au niveau local avec le SIDPC de la Préfecture pour affiner le scénario d'origine volcanique (localisation et volume des matériaux mobilisés, hauteur de la vague produite). L'OVSM-IPGP a également été un acteur central de l'exercice 2023 puisque son équipe était en charge de prévenir au Centre d'Alerte aux Tsunamis du Pacifique (PTWC) et le Point Focal d'Alerte aux Tsunamis (TWFP) afin d'enclencher l'exercice au niveau régional. L'équipe s'est également attachée à insérer dans cet exercice des phénomènes volcaniques, en jouant en interne la dispersion de cendres dans l'atmosphère associée au phénomène d'effondrement.

Pendant l'exercice du 23 mars 2023, l'OVSM-IPGP a transmis au PTWC et TWFP deux Notices d'Observatoire Volcanologique sur la Menace Tsunami (VONUT), et a produit en interne quatre Notices d'Observatoire Volcanologique pour l'Aviation (VONA). L'ensemble des notices a ensuite été communiquée à la communauté scientifique française de volcanologie pour améliorer notre préparation à l'occurrence d'un tsunami d'origine volcanique en contexte insulaire (**Figure 44** et **Figure 45**). Le chronogramme du scénario est résumé par la **Figure 46**.



TEST...VONUT NUMBER 2...TEST

...THIS MESSAGE IS FOR THE CARIBEWAVE23 EXERCISE ONLY...

TEST...VOLCANO OBSERVATORY NOTICE FOR TSUNAMI THREAT ...TEST
TEST...VONUT...TEST

(1) TEST... VOLCANO OBSERVATORY NOTICE FOR TSUNAMI THREAT - VONUT

(2) TEST... Issued: 20230323/1355Z

(3) TEST... Volcano: Pelee 360120

(4) TEST... Current Aviation Colour Code: Red

(5) TEST... Previous Aviation Colour Code : Red

(6) TEST... Source: Volcanological and Seismological Observatory of Martinique (OVSM)

(7) TEST... Notice Number: 2023-02

(8) TEST... Volcano Location: 1448N6110W

(9) TEST... Area: Martinique Island, WI

(10) TEST... Summit Elevation: 4577 FT (1395 M)

(11) TEST... Volcanic Activity Summary:
- Major partial volcano flank collapse started at 1350Z and is ongoing with several slide blocks succeeding within few tens of seconds.
- Explosive eruption started at 1350Z within seconds of the collapse and is underway with significant ash emission into the atmosphere.
- The collapse generated a debris avalanche that travelled 6 km away from the summit and entered the sea at 1352Z, 2 minutes after the onset.
- A tsunami was generated at the point of sea entry.
- Visible ballistic blocks reached >2km from the summit and ashfall visible to the west of the volcano.
- Pyroclastic density currents associated to the collapse likely reached the sea to the Southwest and likely are affecting other sectors of volcano.
- Debris flows (lahars) are likely on valleys spreading from the summit and impacted by the eruption and deposits, could reach the sea to the West.
- Continuous energetic seismicity is still recorded (hybrid, long-period, and tremor events) with several earthquakes of magnitude >M3 occurring less than 1 km below the summit.
- Eruption magnitude and intensity likely to increase.
- Initial phreatic explosion could lead to a magmatic explosive eruption with significant ash fallout and mobile pyroclastic flows that could reach the sea.
- The Aviation Color Code and Volcano Alert Level remains at RED/ ALERT.

(12) TEST... Sea sector of the impact (North, South, East, West) South-west of the volcano

(13) TEST... Name of the sea (Caribbean, Atlantic, Dominique Channel)
Caribbean Sea

(14) TEST... Closest tide gauges
prec: https://www.ioc-sealevelmonitoring.org/station.php?code=prec
ftfr: https://www.ioc-sealevelmonitoring.org/station.php?code=ftfr
lero: https://www.ioc-sealevelmonitoring.org/station.php?code=lero
rose: https://www.ioc-sealevelmonitoring.org/station.php?code=rose
stlu: https://www.ioc-sealevelmonitoring.org/station.php?code=stlu
ptmd: https://www.ioc-sealevelmonitoring.org/station.php?code=ptmd
mrlg: https://www.ioc-sealevelmonitoring.org/station.php?code=mrlg

(15) TEST... Remarks:
Part of our network is unavailable. Prêcheur tide gauge might be damaged.

(16) TEST... Contacts :
Dr : Guillaume CARAZZO (Director)
tel: +596 696 60 34 85
fax: +596 596 55 80 80
Email: directionovsm@services.cnrs.fr

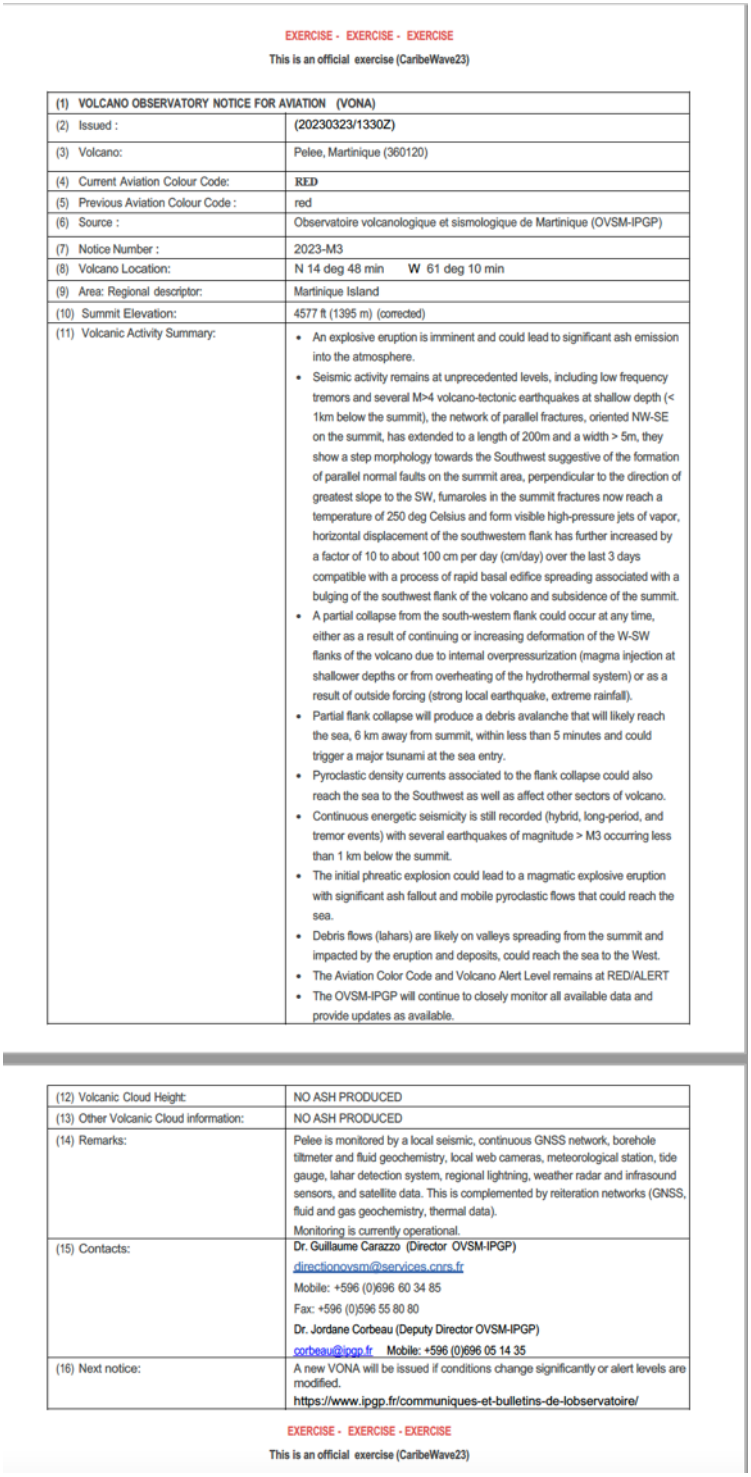
Dr : Jordane CORBEAU (Deputy director)
tel : +596 696 05 04 71
fax: +596 596 55 80 80
Email : corbeau@ipgp.fr

(17) TEST... Next Notice:

A new VONUT will be issued if conditions change significantly.
Volcanic information can be found in:
http://www.ipgp.fr/en

THIS IS A TEST MESSAGE. DO NOT TAKE ACTION BASED ON THIS TEST MESSAGE.

Figure 44. Exemple des Volcano Observatory Notice for Tsunami Threat (VONUT), les nouveaux documents testés lors de Caribe Wave 2023 qui ont été transmis au Centre d'Alerte aux Tsunamis du Pacifique (PTWC) et au Point Focal d'Alerte aux Tsunamis (TWFP) au cours de l'exercice Caribe Wave 2023.



EXERCISE - EXERCISE - EXERCISE

This is an official exercise (CaribeWave23)

(1) VOLCANO OBSERVATORY NOTICE FOR AVIATION (VONA)	
(2) Issued :	(20230323/1330Z)
(3) Volcano:	Pelee, Martinique (360120)
(4) Current Aviation Colour Code:	RED
(5) Previous Aviation Colour Code :	red
(6) Source :	Observatoire volcanologique et sismologique de Martinique (OVSM-IPGP)
(7) Notice Number :	2023-M3
(8) Volcano Location:	N 14 deg 48 min W 61 deg 10 min
(9) Area: Regional descriptor:	Martinique Island
(10) Summit Elevation:	4577 ft (1395 m) (corrected)
(11) Volcanic Activity Summary:	• An explosive eruption is imminent and could lead to significant ash emission into the atmosphere. • Seismic activity remains at unprecedented levels, including low frequency tremors and several M>4 volcano-tectonic earthquakes at shallow depth (< 1km below the summit), the network of parallel fractures, oriented NW-SE on the summit, has extended to a length of 200m and a width > 5m, they show a step morphology towards the Southwest suggestive of the formation of parallel normal faults on the summit area, perpendicular to the direction of greatest slope to the SW, fumaroles in the summit fractures now reach a temperature of 250 deg Celsius and form visible high-pressure jets of vapor, horizontal displacement of the southwestern flank has further increased by a factor of 10 to about 100 cm per day (cm/day) over the last 3 days compatible with a process of rapid basal edifice spreading associated with a bulging of the southwest flank of the volcano and subsidence of the summit. • A partial collapse from the south-western flank could occur at any time, either as a result of continuing or increasing deformation of the W-SW flanks of the volcano due to internal overpressurization (magma injection at shallower depths or from overheating of the hydrothermal system) or as a result of outside forcing (strong local earthquake, extreme rainfall). • Partial flank collapse will produce a debris avalanche that will likely reach the sea, 6 km away from summit, within less than 5 minutes and could trigger a major tsunami at the sea entry. • Pyroclastic density currents associated to the flank collapse could also reach the sea to the Southwest as well as affect other sectors of volcano. • Continuous energetic seismicity is still recorded (hybrid, long-period, and tremor events) with several earthquakes of magnitude > M3 occurring less than 1 km below the summit. • The initial phreatic explosion could lead to a magmatic explosive eruption with significant ash fallout and mobile pyroclastic flows that could reach the sea. • Debris flows (lahars) are likely on valleys spreading from the summit and impacted by the eruption and deposits, could reach the sea to the West. • The Aviation Color Code and Volcano Alert Level remains at RED/ALERT • The OVSM-IPGP will continue to closely monitor all available data and provide updates as available.

(12) Volcanic Cloud Height:	NO ASH PRODUCED
(13) Other Volcanic Cloud information:	NO ASH PRODUCED
(14) Remarks:	Pelee is monitored by a local seismic, continuous GNSS network, borehole tiltmeter and fluid geochemistry, local web cameras, meteorological station, tide gauge, lahar detection system, regional lightning, weather radar and infrasound sensors, and satellite data. This is complemented by reiteration networks (GNSS, fluid and gas geochemistry, thermal data). Monitoring is currently operational.
(15) Contacts:	Dr. Guillaume Carazzo (Director OVSM-IPGP) directionovsm@services.cnrs.fr Mobile: +596 (0)696 60 34 85 Fax: +596 (0)596 55 80 80 Dr. Jordane Corbeau (Deputy Director OVSM-IPGP) corbeau@ipgp.fr Mobile: +596 (0)696 05 14 35
(16) Next notice:	A new VONA will be issued if conditions change significantly or alert levels are modified. https://www.ipgp.fr/communiques-et-bulletins-de-lobservatoire/

EXERCISE - EXERCISE - EXERCISE

This is an official exercise (CaribeWave23)

Figure 45. Exemple du message d'un des quatre messages Volcano Observatory Notice for Aviation (message VONA 3 du 2023-03-23 13:30 Z time) qui ont rédigés par l'OVSM-IPGP et qui ont été transmis au Centre d'Alerte aux Tsunamis du Pacifique (PTWC) et au Point Focal d'Alerte aux Tsunamis (TWFP) au cours de l'exercice Caribe Wave 2023.

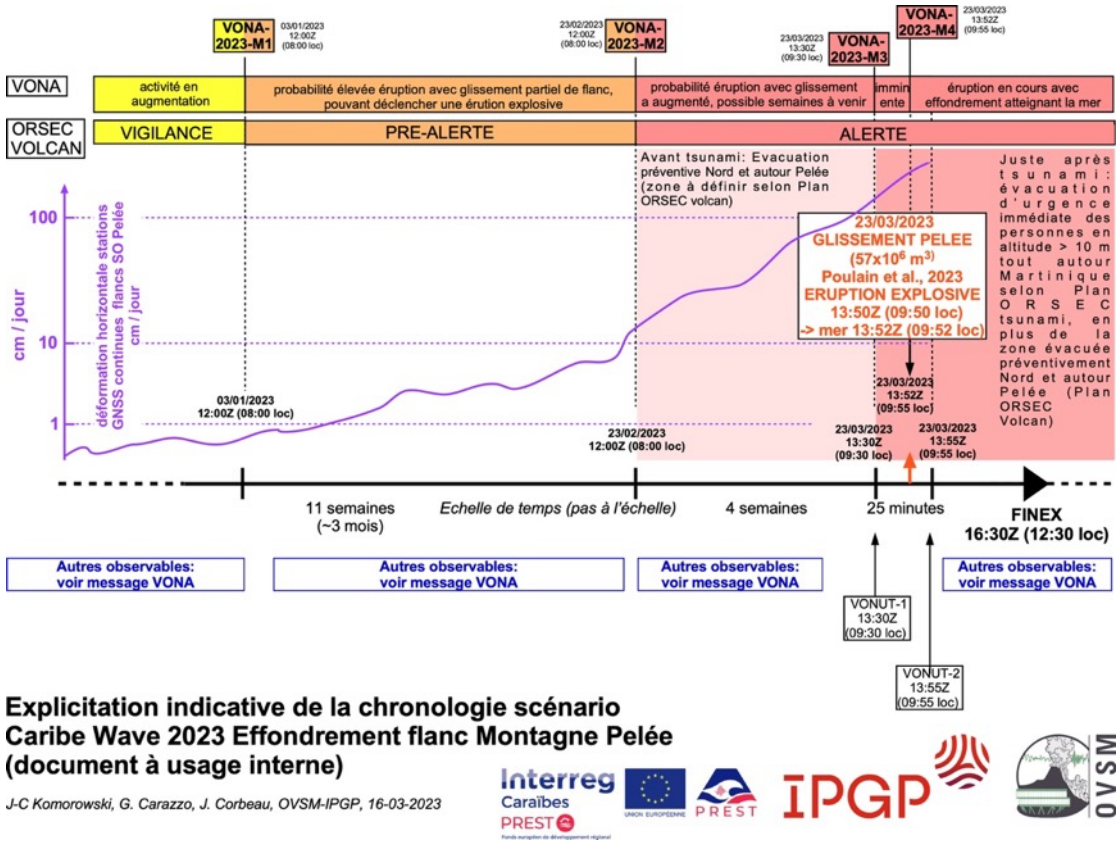


Figure 46. Chronogramme du scénario « effondrement partiel de la Montagne Pelée, tsunami d'origine volcanique » de l'exercice de l'exercice Caribe Wave 2023, produit par l'OVSM-IPGP avec le soutien du projet Interreg Caraibes PREST.

Participation à l'exercice "NOVI - Séisme fort"

Sollicité par le SIDPC de la Préfecture, l'OVSM a participé activement à l'exercice **NOVI – Séisme fort** du 19 octobre 2023, destiné à tester le nouveau plan ORSEC Séisme mis à jour en début d'année 2023 et validé en octobre 2023. L'objectif principal du SIDPC consistait à tester la chaîne d'alerte et de décision des différents services.

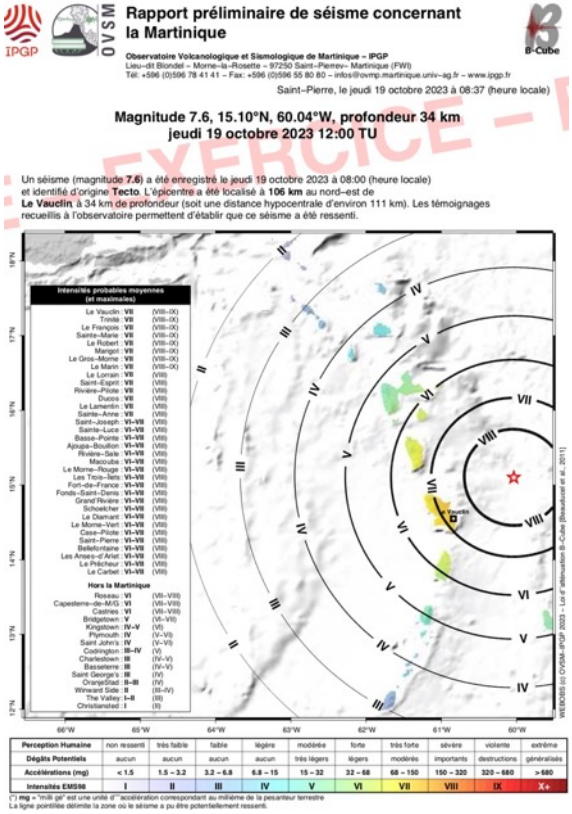
L'équipe de l'OVSM, soutenue par l'IPGP, a participé au comité de pilotage de l'exercice, principalement pour définir le scénario (position, profondeur et magnitude d'un séisme majeur au large de la Martinique, provoquant des dégâts et de nombreuses victimes). L'équipe s'est également attachée à insérer dans cet exercice des phénomènes sismiques réalistes, en jouant en interne la survenue de répliques à la suite du séisme principal. Le déroulé de l'exercice qui a été suivi par l'équipe de l'OVSM est présenté en **Figure 47**.

Pendant l'exercice du 19 octobre, ont été transmis au SIDPC : les différents communiqués B3 pour le séisme majeur et les répliques principales qui ont suivi, et un bilan de l'activité sismique à la mi-journée contenant une carte de localisation des séismes et le mécanisme au foyer du séisme majeur (**Figure 48**).

TIMELINE
Exercice SEISME – NOVI
Martinique, 19 Octobre 2023

DATE	HEURE (TU)	HEURE (locale)	EVENEMENTS - ACTIONS	N° séisme	ACTEURS
19/10/23	12:00	08:00	**Séisme M = 7,6**	1	
	12:00	08:00	**BLACK-OUT COMMUNICATIONS**		
	12:01	08:01	Évacuation de l'OVSM, état des lieux des dégâts et décision sur l'opérabilité du bâtiment		**OVSM**
	12:02	08:02	Déploiement valise Inmarsat		**OVSM**
	12:03	08:03	**Appel Téléphonique SIDPC** Message à transmettre : **INFO DU B3 AUTO** **Loc PhaseWorm – info automatique, préliminaire, non validée par un analyste :** Séisme majeur environ **M 7,5**, environ **100 km au NE du Vauclin**, environ **30 km de profondeur.** Largement ressenti en Martinique et dans les Îles voisines Probabilité élevée de répliques pouvant atteindre la magnitude 6 à 7 à court terme		**OVSM**
	12:05	08:05	Alerte Tsunami / Réception par email et fax du PTWC du message 1		**OVSM** / OVSG / Paris
			Equipe 1 : localisation le plus rapidement possible pour envoi du communiqué revu par un analyste		
			Equipe 2 : vérification bâtiment, connexions, données …		
			Si possible - Equipe 3 : appels divers (proches, …) et tenue d'une main courante des événements		
	12:07	08:07	**Appel inter-observatoires** / Point sur ce qui est fonctionnel		**OVSM** / OVSG
	12:08	08:08	**Appel à Paris** / Alerte		**OVSM** / Paris
	12:10	08:10	Cellule de crise à Paris		OVS Paris
	12:15	08:15	Collecte des données / **Basculer sur OVSG ou Trinidad**		**Paris**
19/10/23	12:45	08:45	**REPRISE DES COMMUNICATIONS**		
19/10/23	12:50	08:50	**REPLIQUE – Séisme M = 6,9**	2	
			Equipe 1 : dépouillement du SEFRAN et localisation des répliques les plus fortes		
	13:00	09:00	**Mail SIDPC - Publication B3 validé** Site IPGP, Facebook, Twitter	1	**OVSM** / Paris
19/10/23	13:10	09:10	**REPLIQUE – Séisme M = 5,4**	3	
			Equipe 1 : dépouillement du SEFRAN et localisation des répliques les plus fortes		
	13:20	09:20	**Mail SIDPC - Publication B3 validé** (REPLIQUE) Site IPGP, Facebook, Twitter	2	**OVSM** / Paris
19/10/23	14:40	10:40	**REPLIQUE – Séisme M = 6,0**	4	
			Equipe 1 : dépouillement du SEFRAN et localisation des répliques les plus fortes		
19/10/23	16:30	12:30	**Mail SIDPC - Publication BILAN de synthèse de l'activité à la mi-journée** Site IPGP, Facebook, Twitter	1, 2, 3, 4 et +	**OVSM** / Paris
19/10/23	16:30	12:30	**FINEX**		

Figure 47. Détail des différentes actions menées à l'OVSM durant l'exercice.



Rapport préliminaire de séisme concernant la Martinique

Observatoire Volcanologique et Sismologique de Martinique – IPGP
Lieu-dit Blondel – Morne-la-Rosette – 97250 Saint-Pierre– Martinique (FWI)
Tél: +596 (0)596 78 41 41 – Fax: +596 (0)596 55 80 80 – infos@ovmp.martinique.univ-ag.fr – www.ipgp.fr

Saint-Pierre, le jeudi 19 octobre 2023 à 08:37 (heure locale)

Magnitude 7.6, 15.10°N, 60.04°W, profondeur 34 km
jeudi 19 octobre 2023 12:00 TU

EXERCICE – EXERCICE - EXERCICE

Un séisme (magnitude **7.6**) a été enregistré le jeudi 19 octobre 2023 à 08:00 (heure locale) et identifié d'origine **Tecto**. L'épicentre a été localisé à **106 km** au nord–est de **Le Vauclin** à 34 km de profondeur (soit une distance hypocentrale d'environ 111 km). Les témoignages recueillis à l'observatoire permettent d'établir que ce séisme a été ressenti.

Intensités probables moyennes (et maximales)

Le Vauclin : VII (VIII–IX)
Trinité : VII (VIII–IX)
Le François : VII (VIII–IX)
Sainte-Marie : VII (VIII–IX)
Le Robert : VII (VIII–IX)
Marigot : VII (VIII–IX)
Le Gros–Morne : VII (VIII–IX)
Le Marin : VII (VIII–IX)
Le Lorrain : VII (VIII)
Saint–Esprit : VII (VIII)
Rivière–Pilote : VII (VIII)
Ducos : VII (VIII)
Le Lamentin : VII (VIII)
Sainte–Anne : VII (VIII)
Saint–Joseph : VI–VII (VIII)
Sainte–Luce : VI–VII (VIII)
Basse–Pointe : VI–VII (VIII)
Ajoupa–Bouillon : VI–VII (VIII)
Rivière–Salée : VI–VII (VIII)
Macouba : VI–VII (VIII)
Le Morne–Rouge : VI–VII (VIII)
Les Trois–Ilets : VI–VII (VIII)
Fort–de–France : VI–VII (VIII)
Fonds–Saint–Denis : VI–VII (VIII)
Grand'Rivière : VI–VII (VIII)
Schoelcher : VI–VII (VIII)
Le Diamant : VI–VII (VIII)
Le Morne–Vert : VI–VII (VIII)
Case–Pilote : VI–VII (VIII)
Saint–Pierre : VI–VII (VIII)
Bellefontaine : VI–VII (VIII)
Les Anses–d'Arlet : VI–VII (VIII)
Le Prêcheur : VI–VII (VIII)
Le Carbet : VI–VII (VIII)

Hors la Martinique

Roseau : VI (VII–VIII)
Capesterre–de–M/G : VI (VII–VIII)
Castries : VI (VII–VIII)
Bridgetown : V (VI–VII)
Kingstown : IV–V (VI)
Plymouth : IV (V–VI)
Saint John's : IV (V–VI)
Codrington : III–IV (V)
Charlestown : III (IV–V)
Basseterre : III (IV–V)
Saint George's : III (IV)
OranjeStad : II–III (IV)
Windward Side : II (III–IV)
The Valley : I–II (III)
Christiansted : I (II)

Perception Humaine	non ressenti	très faible	faible	légère	modérée	forte	très forte	sévère	violente	extrême
Dégâts Potentiels	aucun	aucun	aucun	aucun	très légers	légers	modérés	importants	destructions	généralisés
Accélérations (mg)	< 1.5	1.5 – 3.2	3.2 – 6.8	6.8 – 15	15 – 32	32 – 68	68 – 150	150 – 320	320 – 680	> 680
Intensités EMS98	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X+

(*) **mg** = "milli gé" est une unité d'" accélération correspondant au millième de la pesanteur terrestre
La ligne pointillée délimite la zone où le séisme a pu être potentiellement ressenti.

WEBOBS (c) OVSM-IPGP 2023 - Loi d'atténuation B-Cube (Beauducel et al., 2011)

Localisation du séisme principal du 19 octobre 2023 à 08h00 (heure locale) (étoile) et des 3 répliques les plus importantes ressenties en Martinique en date du 19 octobre 2023 à 12h30 (heure locale) (Source WebObs/OVSM).

IPGP | Université Paris Cité | cnrs | OVSM

EXERCICE – EXERCICE - EXERCICE

Rapport de l'activité sismique concernant la Martinique

Saint-Pierre, le 19 octobre 2023 à 12h30 (heure locale)

Un séisme fort (magnitude **7,6**) a été enregistré **le jeudi 19 octobre 2023 à 8h00** (heure locale) et identifié d'origine tectonique. L'épicentre a été localisé à 105 km au nord-est de Le Vauclin, à 34 km de profondeur.
Ce séisme, très fortement ressenti en Martinique (intensité **VII à VIII-IX**), a eu lieu au large de l'île dans la zone de rupture présumée du séisme historique de 1839 (intensité VIII à IX).
Il s'agit d'un séisme de subduction avec un mécanisme de rupture en compression, lié au plongement des plaques Nord et Sud-Américaines sous la plaque Caraïbe (voir annexe 1).

En date du **19 octobre 2023 à 12h30** (heure locale), **9 répliques** ont été enregistrées par l'OVSM-IPGP, dont les **3** plus importantes ont été ressenties en Martinique :

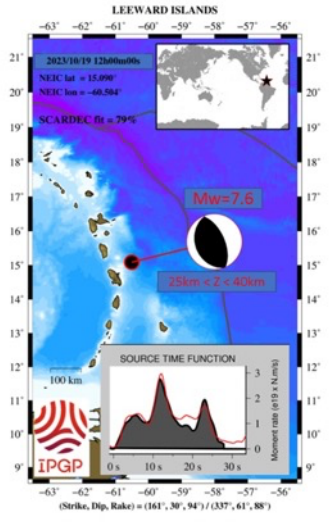
- Le 19 octobre 2023 à **08h50** (heure locale), une réplique de magnitude **6,9** a été ressentie et localisée à 27 km de profondeur à 108 km à l'est-nord-est de Le Vauclin ;
- Le 19 octobre 2023 à **09h10** (heure locale), une réplique de magnitude **5,4** a été ressentie et localisée à 36 km de profondeur à 89 km à l'est-nord-est de Le Vauclin ;
- Le 19 octobre 2023 à **10h40** (heure locale), une réplique de magnitude **6,0** a été ressentie et localisée à 32 km de profondeur à 92 km à l'est de Le Vauclin.

La carte ci-dessous indique la position du séisme principal (étoile) et des 3 répliques les plus importantes décrites précédemment.

L'activité sismique devrait rester soutenue dans les jours prochains, et d'autres répliques largement ressenties peuvent à nouveau se produire.

La direction de l'OVSM-IPGP

EXERCICE – EXERCICE - EXERCICE



(Strike, Dip, Rake) = (161°, 30°, 94°) / (337°, 61°, 88°)

ANNEXE 1 : *Caractéristiques du séisme du 19 octobre 2023 à 08h00 heure locale (12h00 TU) déterminées par la méthode SCARDEC à partir des données de l'Observatoire GEOSCOPE (réseau global de stations sismologiques large bande). Le mécanisme au foyer associé à la rupture est en compression, et indique un mouvement de convergence au niveau de la zone de subduction située au large de la Martinique (Source M. Vallée, IPGP).*

Figure 48. Exemples des documents transmis par l'OVSM au cours de l'exercice NOVI 2023 (du haut à gauche au bas à droite) : communiqué B3 sur le séisme majeur ; bilan de l'activité sismique à la mi-journée et détail des répliques principales ; carte de localisation du séisme majeur et de ses répliques principales ; mécanisme au foyer associé au séisme majeur.

Vulgarisation scientifique, Conférences et médias

Lors de l'année 2023, 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. Toutes ces actions sont détaillées ci-dessous.

Actions de vulgarisation scientifique

- le ***25 janvier 2023***, participation au **forum des métiers** du Séminaire Collège à Fort-de-France (J. Corbeau) ;
- le ***9 février 2023***, accueil d'élèves de classes de 1ère spécialité SVT à l'OVSM dans le cadre de la semaine d'enseignement **« Hors les murs »** (J. Corbeau) ;
- le ***14 mars 2023***, participation au jury du **concours CGénial** Collège au CDST de Saint-Pierre (J. Corbeau) ;
- le ***21 mars 2023***, accueil d'un groupe de la **DEAL** pour une présentation des missions de l'OVSM (J. Corbeau) ;
- le ***21 mars 2023***, visite du **président du Conseil Executif de la CTM** et d'une délégation de la mairie de Fonds-Saint-Denis (G. Carazzo, C. Vidal) ;
- le ***23 mars 2023***, participation à l'exercice **Caribe Wave** pour l'alerte aux tsunamis (équipe OVSM) ;
- le ***7 octobre 2023***, tenue d'un stand lors de la **Journée de la Résilience** à Saint-Martin (J. Corbeau) **;**
- le ***13 octobre 2023***, tenue d'un stand lors de la **Journée de la Résilience** à la Galéria, Le Lamentin (J-B. de Chabalier) ;
- le ***24 novembre 2023***, tenue d'un stand lors de la **semaine Réplik** à Schoelcher (J. Corbeau, D. Mélézan, F. Jadelus, A. Potier, F. Beauducel) ;
- le ***25 novembre 2023***, visite de l'OVSM de la **porte-parole du Ministère de l'Intérieur et des Outre-mers** (F. Beauducel).

Conférences

- le **30 juin 2023,** journée de conférences à l'initiative du Maire de Saint-Pierre et de l'OVSM-IPGP : « Saint-Pierre : mieux vivre à l'ombre du volcan de la Montagne Pelée » au **Centre de Découverte des Sciences de la Terre**, Saint-Pierre (J. Corbeau et J-C. Komorowski de l'OVSM-IPGP, K. Pascal du Montserrat Volcano Observatory, Seismic Research Center, University of the West Indies, Trinidad, T. Lesales, anciennement de l'UA Schoelcher et actuellement à Qatar Media Corporation, A. Foll, Service interministériel de défense et de protection civile, Préfecture de la Région Martinique, A. Marcellin, Université populaire et de prévention, Groupama Antilles-Guyane.
- le **6 juillet 2023**, conférence « Sismicité et séismes majeurs aux Antilles », meeting **CARQUAKES**, La Rochelle (J. Corbeau) ;
- le **26 août 2023**, conférence « Les relations entre les séismes de subduction et l'activité des volcans » à la **Maison des Volcans**, Le Morne-Rouge (J. Corbeau) ;
- le **8 novembre 2023**, conférence « Retour sur 20 ans de sismicité enregistrée en Martinique », **colloque AFPS**, Le Gosier, Guadeloupe (J. Corbeau) ;
- le **8 novembre 2023**, conférence « Itinéraire d'un séisme ressenti dans les observatoires français des Petites Antilles », **colloque AFPS**, Le Gosier, Guadeloupe (J. Corbeau) ;
- le **9 novembre 2023**, poster « Distribution des catalogues et bulletins sismologiques des observatoires français des Petites Antilles », **colloque AFPS**, Le Gosier, Guadeloupe (J. Corbeau) ;
- le **25 novembre 2023**, conférence « Le risque sismique en Martinique » au **Village Réplik**, Schoelcher (J. Corbeau).

Interventions dans les médias

- le **21 mars 2023**, Vià ATV sur la remise des clés de l'ancien observatoire (équipe OVSM) ;
- le **23 mars 2023**, publication d'un article sur l'exercice CaribWave par l'**AFP** (G. Carazzo) ;
- le **8 mai 2023**, sujets au journal télévisé (13h et 19h) de **Martinique la 1ère** sur l'activité de la Montagne Pelée (J. Corbeau, D. Mélézan, C. Vidal) ;
- **avril et mai 2023** : tournage pour le film « Les Fantômes des profondeurs » avec la productrice A. Ghijzelings (J-G. Gabriel, D. Melezan, F. Jadelus) ;
- **mai 2023**, parution dans la revue **Risques Infos** de l'Institut des Risques Majeurs d'un article sur la Montagne Pelée et l'OVSM (A. Michaud-Dubuy) ;

- le **10 juillet 2023**, sujet au journal radio de 18h de **Martinique la 1ère** sur le séisme ressenti d'Antigua de M 6,6 (J-C. Komorowski) ;
- le **11 juillet 2023**, sujet au journal télévisé de 19h de **Martinique la 1ère** sur le séisme ressenti ayant eu lieu au large d'Antigua de M 6,6 (J. Corbeau et J. Vergne) ;
- le **12 juillet 2023**, article dans le journal **France-Antilles** sur la journée de conférences du 30 juin à Saint-Pierre ;
- Le **25 septembre 2023**, sujet au journal télévisé de 20h de **TF1** sur le classement UNESCO de la Montagne Pelée (J-B. de Chabalier) **;**
- le **5 octobre 2023**, sujet au journal radio de **Martinique la 1ère** sur la Fête patronale de Fonds-Saint-Denis (D. Mélézan) ;
- le ***6 octobre 2023***, podcast sur la Montagne Pelée pour **France Télé** (J-B. de Chabalier) ;
- le **14 octobre 2023**, publication d'un article **Médiapart** sur la prévision des séismes majeurs (J. Corbeau) ;
- le **2 décembre 2023**, sujet au journal radio de **Martinique la 1ère** sur le séisme ressenti ayant eu lieu au large de la Guadeloupe (F. Beauducel) ;

Stand et accueil de scolaires lors de la semaine Réplik à Schoelcher.

(gauche) stand Journée de la Résilience à Saint-Martin. (droite) Journée de conférences « Saint-Pierre : mieux vivre à l'ombre du volcan de la Montagne Pelée » à Saint-Pierre.

Projets de recherche

Projet PREST

Réalisations principales du projet PREST en Martinique en 2023

WP5 : Plateforme Marine

L'OVSM-IPGP, dans le cadre du projet PREST, a acquis une plateforme équipée d'un sondeur multi-faisceaux et d'instruments associés tels que le GPS et la centrale inertielle. Cette plateforme est destinée à l'observation et à la mesure des fonds marins afin de surveiller et de comprendre les structures géologiques actives près des côtes des îles, telles que les failles, les volcans, l'évolution des petites fonds marins après une crue ou un cyclone, etc. avec une résolution élevée d'environ 50 cm. Ces zones sont souvent difficilement explorées par les navires océanographiques dû aux petits fonds. La plateforme pourra être partagée avec d'autres organismes pour une utilisation mutualisée.

Pour répondre à ces objectifs, nous avons organisé l'année 2023 avec plusieurs réalisations :

- Suivre les phénomènes de lahars (coulées de boues torrentielles) dans la commune du Prêcheur (**Figure 49**) en estimant par exemple les apports de volumes de sédiments entre l'amont et l'aval de la rivière avec une bathymétrie état zéro haute résolution (grille de 50 cm).

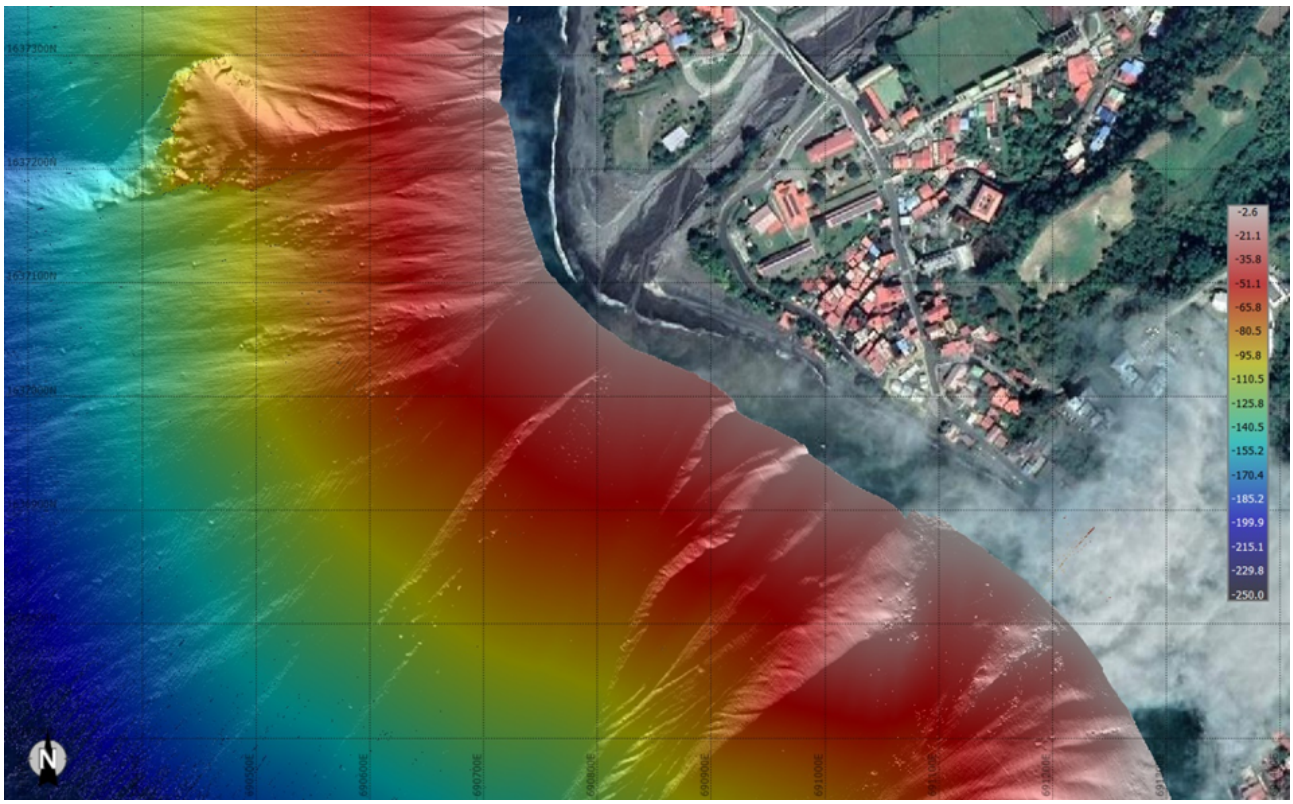


Figure 49. Cartographie des fonds marins de l'embouchure de la rivière du Prêcheur, grille à 50 cm.

- Pour démontrer que la plateforme est mobile et transportable dans l'arc des antilles, une campagne a été organisée en Guadeloupe en juin 2023 (**Figure 49**), en collaboration avec l'ObsErA (Observatoire de l'eau et de l'érosion aux Antilles, IPGP), basé à l'OVSG. L'ObsErA surveille les processus d'altération, d'érosion et de transports des sédiments aux Antilles, avec l'instrumentation de plusieurs bassins versants, dont la Grande Rivière de Vieux-Habitants. La plateforme marine leur donne donc une nouvelle opportunité : cartographier l'embouchure de cette rivière afin de décrire la forme, la taille et la nature du cône au large, et donc les processus de sédimentation. En répétant ce type de campagne à intervalle régulier, elles compléteront les mesures de transports menées en rivière pour estimer la quantité de sédiments rejetées en mer, et leur impact sur l'environnement littoral.

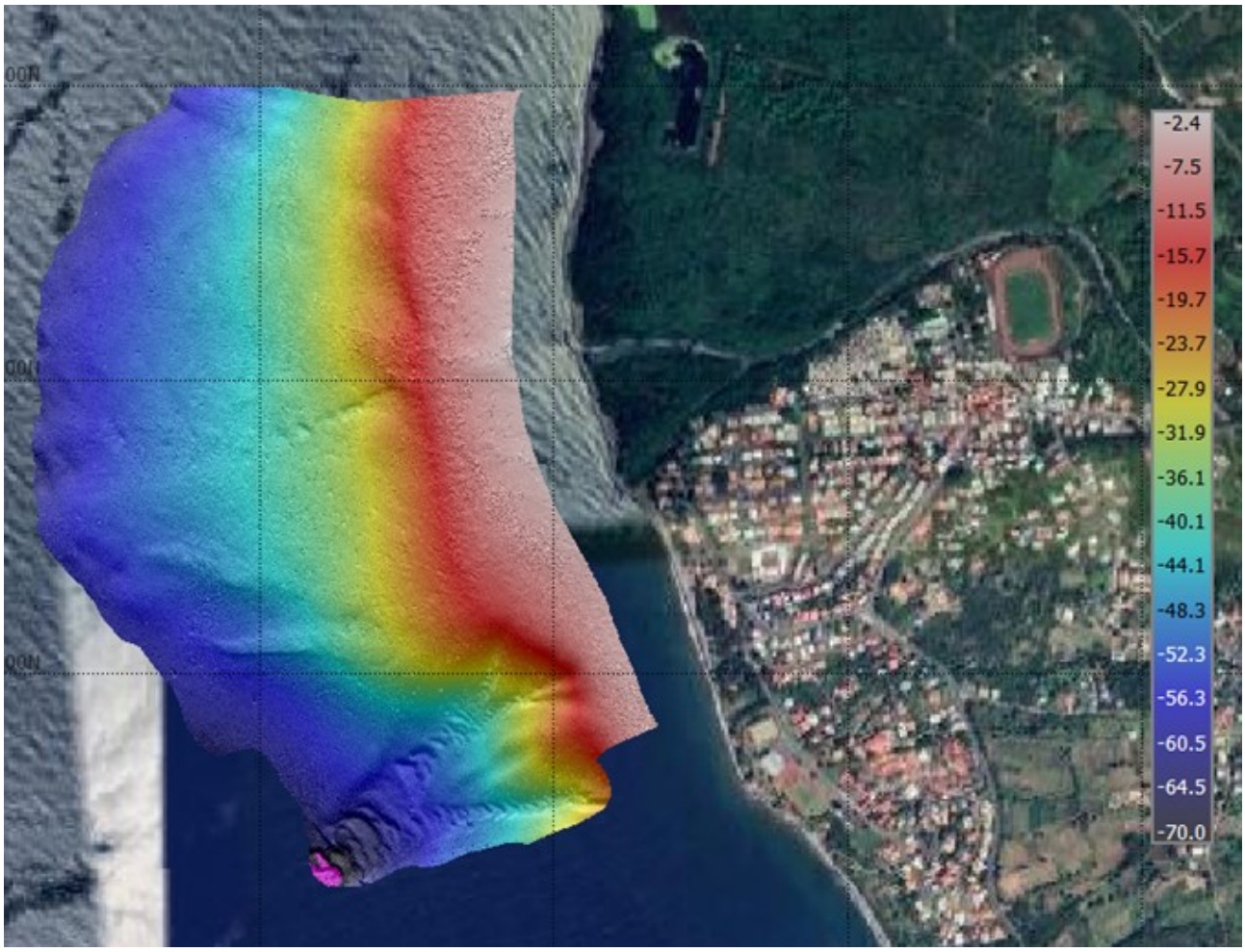


Figure 50. Cartographie des fonds marins de l'embouchure de la rivière de Vieux Habitants (Guadeloupe), grille à 50 cm.

- En collaboration avec LASSOMER, une association dédiée à la préservation de l'environnement marin, une campagne de mesures a été réalisée dans le Sud de la Martinique à Sainte-Luce. Cette initiative vise à étudier l'état initial de différentes zones situées à Sainte-Luce (**Figure 50**), dans l'aire marine WALIWA, qui accueillent des pépinières de coraux Acropora, en voie d'extension aux Antilles. La bathymétrie sera utilisée pour comparer la morphologie des sites de pépinières de coraux et pour mesurer les volumes ainsi que la hauteur des sédiments déposés ou érodés. Cette démarche permettra également d'établir une première représentation 2D/3D des pépinières de coraux. Cette première campagne est exploitée dans le cadre de d'un stage de Master 2 de l'UMR BOREA (CNRS-Université des Antilles).

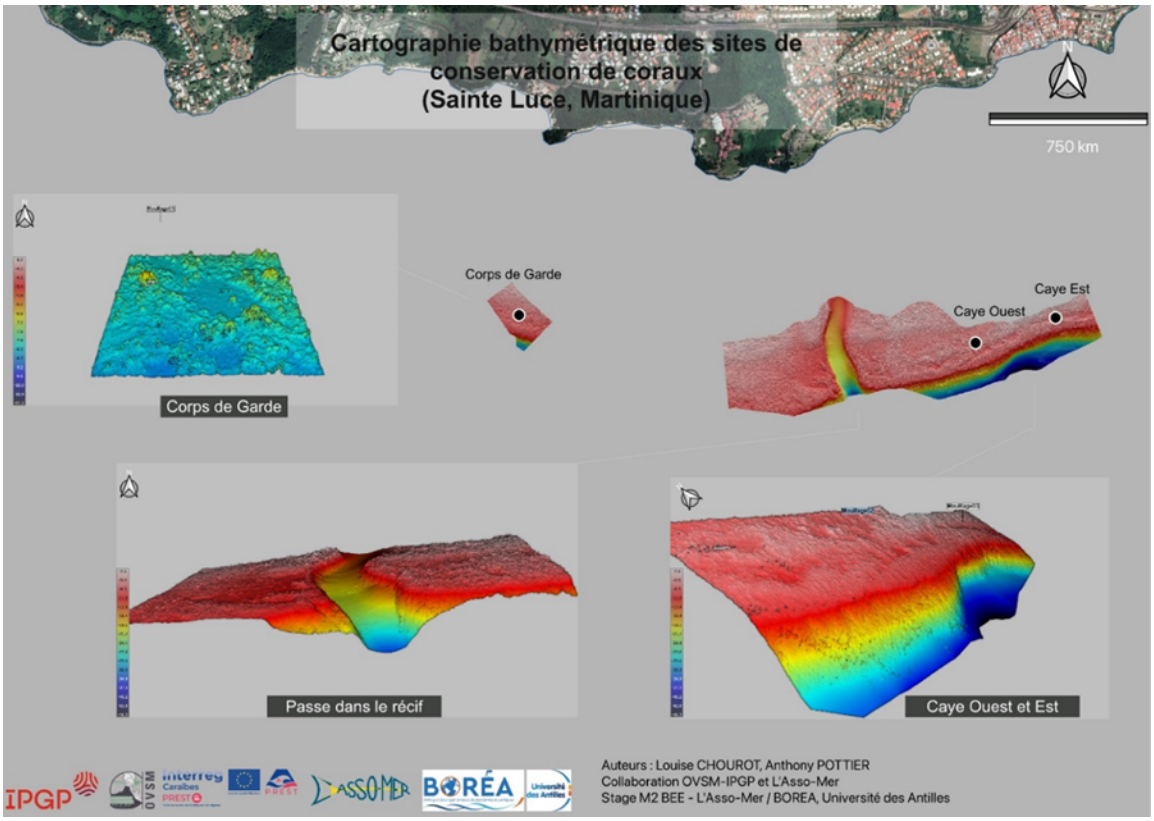


Figure 51. Cartographie bathymétrique des sites de conservation de coraux (Sainte Luce, Martinique) (source Louise CHOUROT / LASSOMER).

Dans le cadre du projet PREST, le LIENSs de La Rochelle Université et l'Office Français de la Biodiversité (OFB) ont collaboré avec l'OVSM pour installer, depuis mars 2023, une bouée océanographique (**Figure 52**) dans la baie de Fort-de-France, avec une durée de fonctionnement maximale de 5 ans. Cette bouée effectue durant 30 secondes, toutes les 15 minutes des mesures de température, conductivité, turbidité, pH, salinité, oxygène dissous et chlorophylle (chl-a), avec en plus la météorologie. Les données sont stockées sur un serveur hébergé par le LIENSs à La Rochelle. Elles sont accessibles pour affichage et téléchargement via un site web dédié : https://prest.scan-datamining.com.

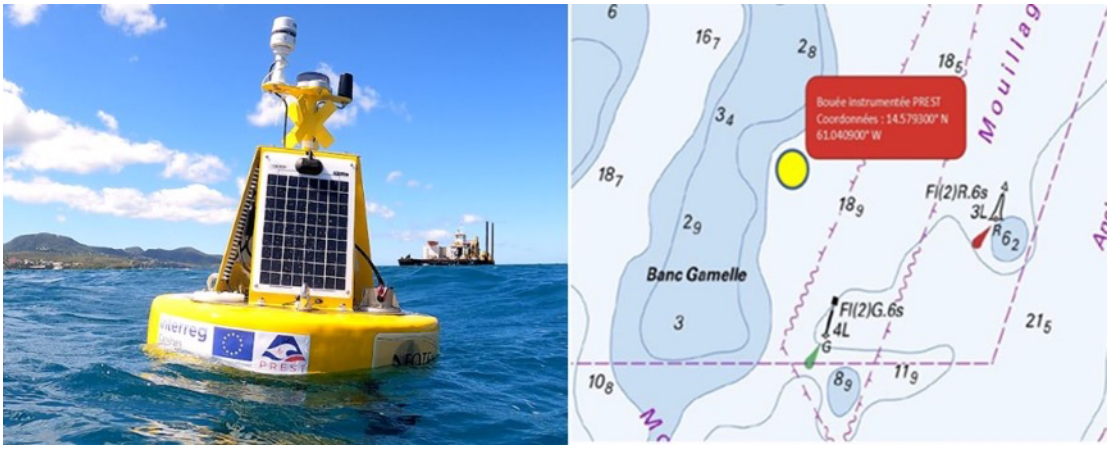


Figure 52. Bouée instrumentée PREST et implantation de la bouée à Fort-de-France.

WP6 : Le CUBI, un sismomètre fond de mer adapté aux Antilles

Le CUBI (Compact Underwater Bottom Instrument) est un sismomètre fond de mer développé dans le projet PREST par l'équipe d'ingénieurs OBS de l'IPGP, sous la direction de Romuald Daniel. Il répond aux besoins spécifiques des Antilles de déploiement rapide de sismomètres fond de mer en cas d'activité tellurique au large des îles : performant, compact, léger, déployable par des petits bateaux locaux, transportable en avion, et simple à utiliser (**Figure 53**).

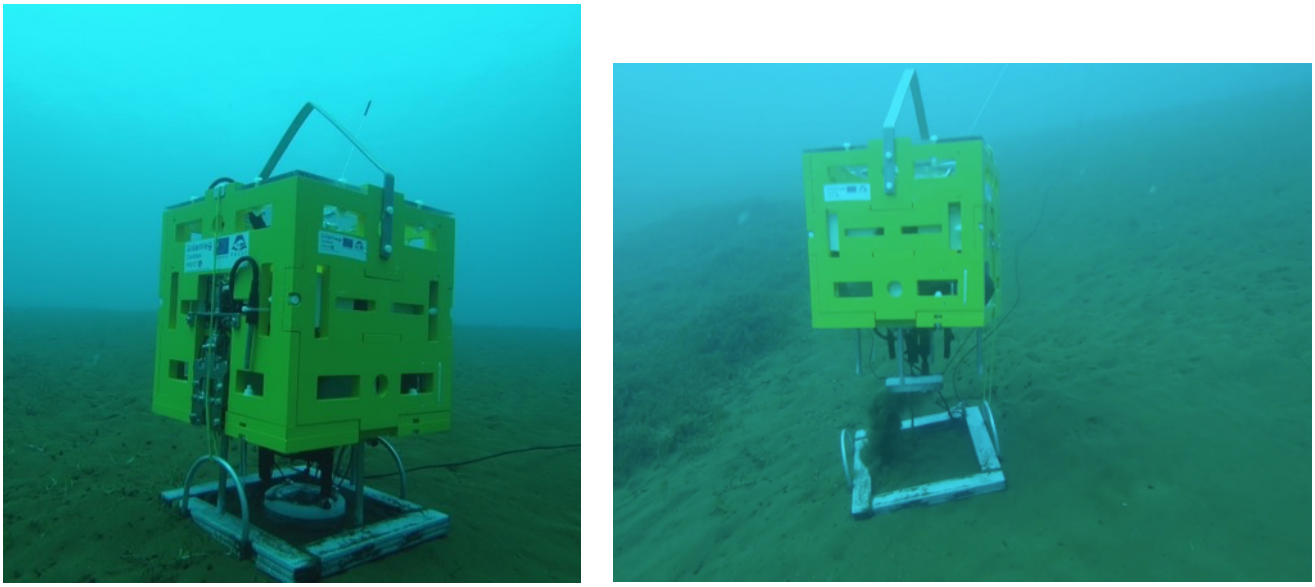


Figure 53. Sismomètre fond de mer "CUBI" en acquisition sur le fond marin, puis se libérant de son lest afin de remonter à la surface.

Une campagne de qualification du CUBI dans des conditions réelles d'utilisation s'est déroulée en Martinique en juillet 2023. Dans un premier temps, l'équipe de l'OVSM s'est formée aux procédures de déploiement et de récupération du sismomètre dans la baie de Saint-Pierre. Le 6 juillet 2023, l'instrument a été mis à l'eau à 1100 m de profondeur au large du Carbet et récupéré sans problèmes après 15 jours d'enregistrements. Analysées par les sismologues de l'OVSM, les données s'avèrent de très bonne qualité (**Figure 54**). Le CUBI est prêt à améliorer la compréhension de la sismicité au large des îles.

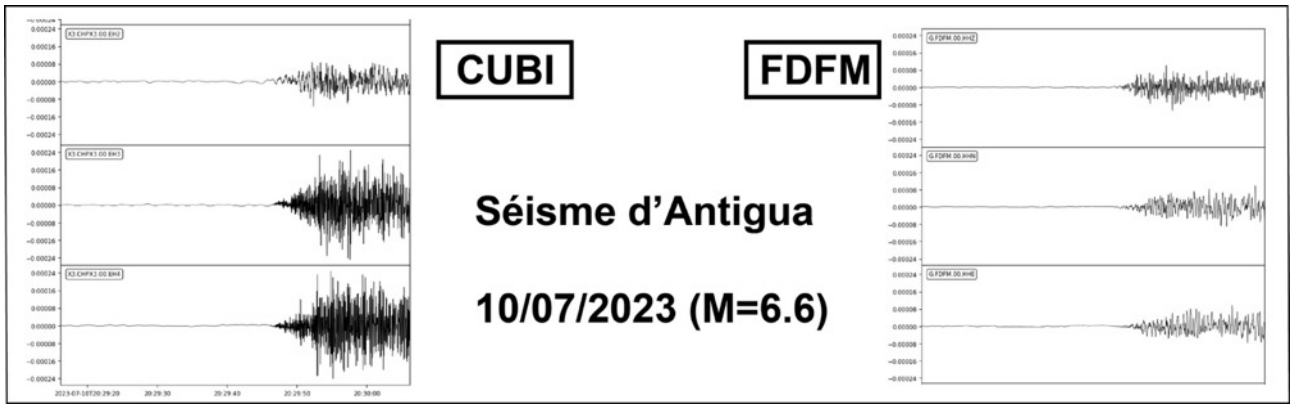


Figure 54. Comparaison du sismogramme du CUBI avec celui de la station Geoscope de l'OVSM (FDFM) pour un séisme régional.

Publications PREST en 2023

Calais, E., O.F. Gonzalez, E.D. Arango-Arias, B. Moreno, R. Palau, M. Cutie, E. Diez , C. Montenegro, E. Rodriguez Roche, J. Garcia, E. Castellanos, S. Symithe (2023). Current deformation along the northern Caribbean plate boundary from GNSS measurements in Cuba, Tectonophysics, 868, 2023, 230068, https://doi.org/10.1016/j.tecto.2023.230068.

Colon Useche, S., M. Ioualalen and V. Clouard, (2023). Mapping of the seismic tsunami intensity along the coast of Martinique, Lesser Antilles, Ocean & Coastal Management, 242, https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2023.106674.

Colon Useche, S., V. Clouard, M. Ioualalen, F. Audemard and T. Monfret, (2022). Simulation of Tsunami Inundation for the Island of Martinique to Nearby Large Earthquakes. Bulletin of the Seismological Society of America; 113 (1): 252–267, https://doi.org/10.1785/0120220093.

Metcalfe, A., S. Moune, J.-C. Komorowski, R. Robertson, T.E. Christopher, E.P. Joseph and R. Moretti, (2023). Diverse magma storage and major and volatile magma composition: What are the implications on the eruptive style across a volcanic arc ? An example of the Lesser Antilles Arc. Earth Science Reviews, 242 (2023). https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2023.104440.

Michaud-Dubuy, A., G. Carazzo, H. Balcone-Boissard, G. Boudon and E. Kaminsky, (2023). Unsuspected explosive activity of Montagne Pelée (Lesser Antilles) during the 25–10 ka period. J. Volcanology Geothermal Res., 440, 107873, https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2023.107873.

Raimbault, B., R. Jolivet, E. Calais, S. Symithe, Y. Fukushima and P. Dubernet, (2023). Rupture geometry and slip distribution of the Mw 7.2 Nippes earthquake, Haiti, from space geodetic data. Geochemistry, Geophysics, Geosystems, 24, e2022GC010752. https:// doi.org/10.1029/2022GC010752.

Seibert, C., Feuillet, N., Ratzov, G., Beck, C., Morena, P., Johannes, L., et al. (2023). Sedimentary records in the Lesser Antilles fore-arc basins provide evidence of large late Quaternary megathrust earthquakes. Geochemistry, Geophysics, Geosystems, 25, e2023GC011152. https://doi.org/10.1029/2023GC011152.

Réseau temporaire de nodes

Déploiement d'antennes sismiques sur la Montagne Pelée

Suite à l'augmentation de l'activité sismique de la Montagne Pelée et dans l'objectif d'une meilleure compréhension de la sismicité d'origine volcanique, des réseaux sismiques temporaires ont été mis en place sous la forme d'antennes denses composées de plusieurs capteurs autonomes. Un premier réseau constitué de 3 antennes a été déployé pendant un mois entre avril et mai 2021, puis un nouveau réseau de 3 antennes a été opéré entre décembre 2022 et juillet 2023.

Chacune de ces trois antennes était constituée de 8 nodes sismiques (**Figure 55**). Chaque node (modèle SmartSolo@ IGU-16HR) est constitué de 3 géophones (suivant les directions verticale, horizontale-nord, et horizontale-est) de fréquence de coupure à 5 Hz, d'une batterie d'environ 4 semaines d'autonomie et d'une antenne GNSS (localisation et horloge temporelle) et d'un système de stockage des données sur carte Flash.

Figure 55. Nodes sismiques, illustration (gauche) et node installé sur le terrain (droite).

Les antennes ont été déployées dans des zones ouvertes sur les flancs de montagne Pelée dans une configuration en forme de spirale et d'ouverture maximale de ~130 m, permettant d'encadrer les épicentres des évènements d'origines volcano-tectoniques (**Figure 56**) :

- Grande Savane (GSA), proche du musée DoME (commune du Prêcheur), en fonctionnement du 07/12/2022 au 28/07/2023 ;
- Morne Lacroix (LAM), deuxième refuge de la Montagne Pelée, en fonctionnement du 15/12/2022 au 19/07/2023 ;
- Pécoul (PEC), proche de la distillerie Depaz, en fonctionnement du 30/11/2022 au 26/07/2023.

La géométrie en forme de spirale a été choisie afin, notamment, de mener des analyses en formation de voie (« beamforming ») permettant de déterminer les azimuts et vitesse apparente des différentes portions du champ d'onde à haute fréquence.

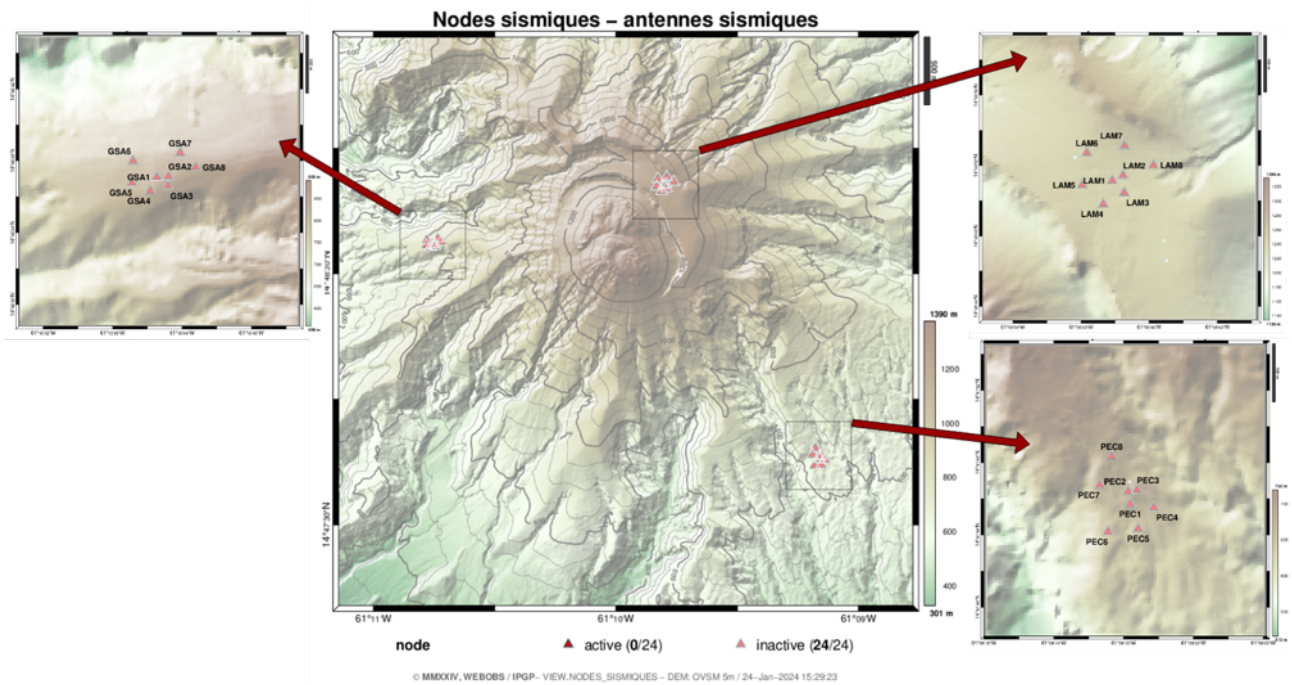


Figure 56. Disposition des antennes autour du sommet de la Montagne Pelée.

Le réseau constitué de ces trois antennes a donc fonctionné dans son ensemble (avec les 24 points de mesure) du 15/12/2022 au 19/07/2023, soit 7 mois de données en quasi-continu, ce qui représente environ 460 Go de données brutes (échantillonnage à 250 Hz).

Les nodes possédant une batterie d'environ 28 jours d'autonomie, une visite était organisée toutes les quatre semaines pour chaque antenne afin de remplacer ses nodes. Cela représente une trentaine d'interventions durant ces 7 mois de fonctionnement en comptant l'installation et la récupération définitives des capteurs.

Tout au long du projet, après chaque rotation, les données étaient extraites des nodes et l'utilisation de plusieurs scripts écrits à l'OVSM permettait d'organiser les données au format SDS, d'extraire et de générer les métadonnées (position, réponse instrumentale, etc). Les données étaient ensuite traitées afin de créer un sismogramme Sefran dédié à ce projet (**Figure 57**). Les signaux des stations permanentes de la Montagne Pelée ont aussi été intégrés au Sefran pour pouvoir les comparer à ceux des nodes. Ce Sefran est couplé à la base de données d'événements de l'observatoire, ce qui permet de visualiser les différents événements recensés sur les 24 stations temporaires déployées. Une vérification manuelle des signaux est en cours afin de vérifier si des évènements non-détectés sur les signaux des stations permanentes sont visibles sur les données des nodes. Cette vérification manuelle sera complétée par l'application d'algorithmes de détection automatique.

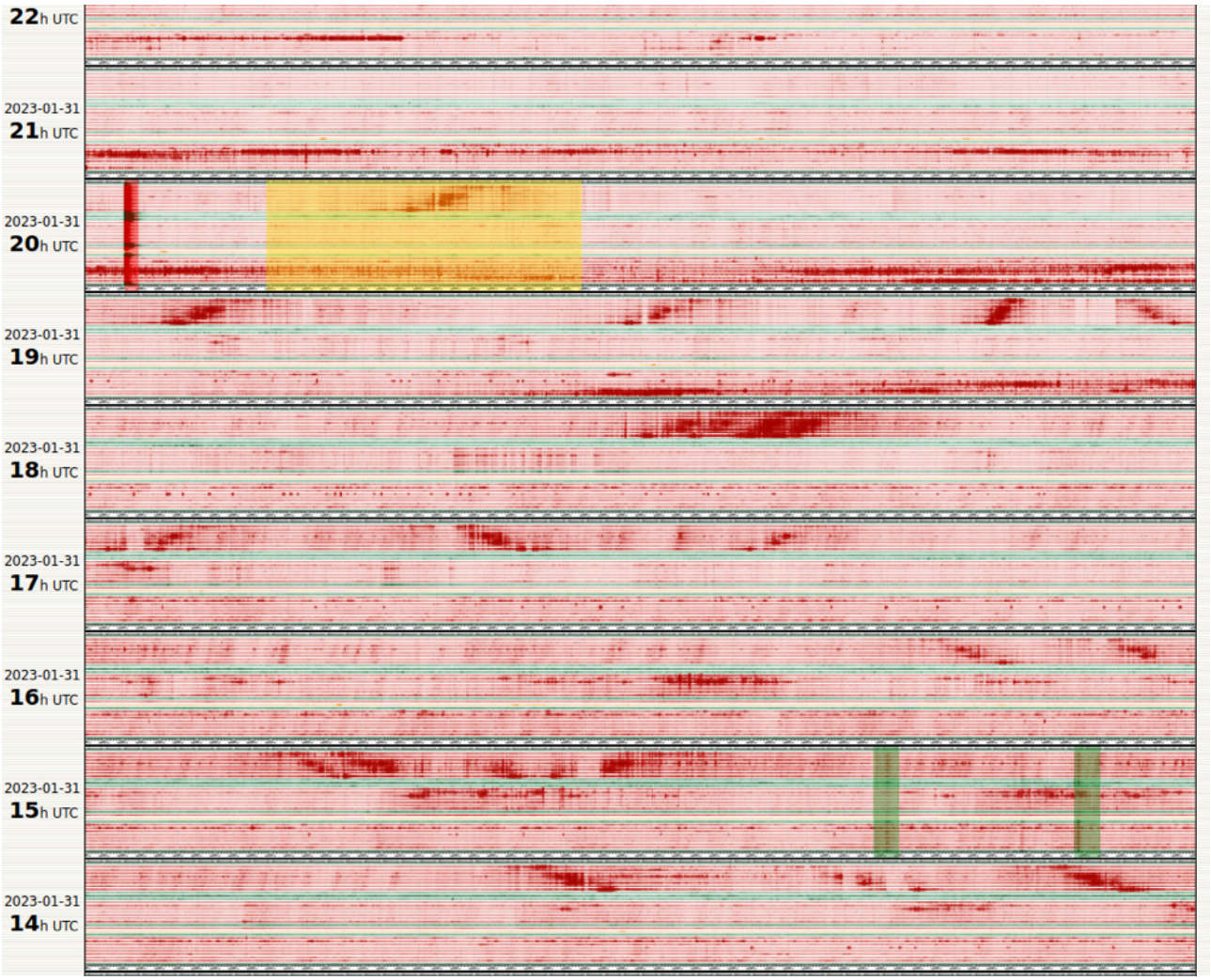


Figure 57. Sefran des antennes nodes avec 4 évènements de la main courante (1 VT en rouge, 2 séismes tectoniques en vert, 1 évènement d'origine anthropique en jaune).

A titre d'exemple, la **Figure 58**, présente les enregistrements d'un séisme volcano-tectonique (en haut) et d'un séisme longue-période (en bas) vus par les nodes de l'antenne PEC (Pécoul). Sur chaque figure, les signaux en gris sont les signaux enregistrés par chaque node de l'antenne, le signal noir en gras correspond au signal sommé des 8 nodes de l'antenne et le signal en bleu est celui de la station permanente la plus proche de l'antenne de nodes. Ces exemples illustrent le gain en termes de rapport signal/bruit (et donc de capacité de détection et de pointé des phases sismiques) induit par la sommation des signaux des nodes, en particulier concernant les évènements profonds où les ondes sismiques directes sont quasiment en phase pour chaque node.

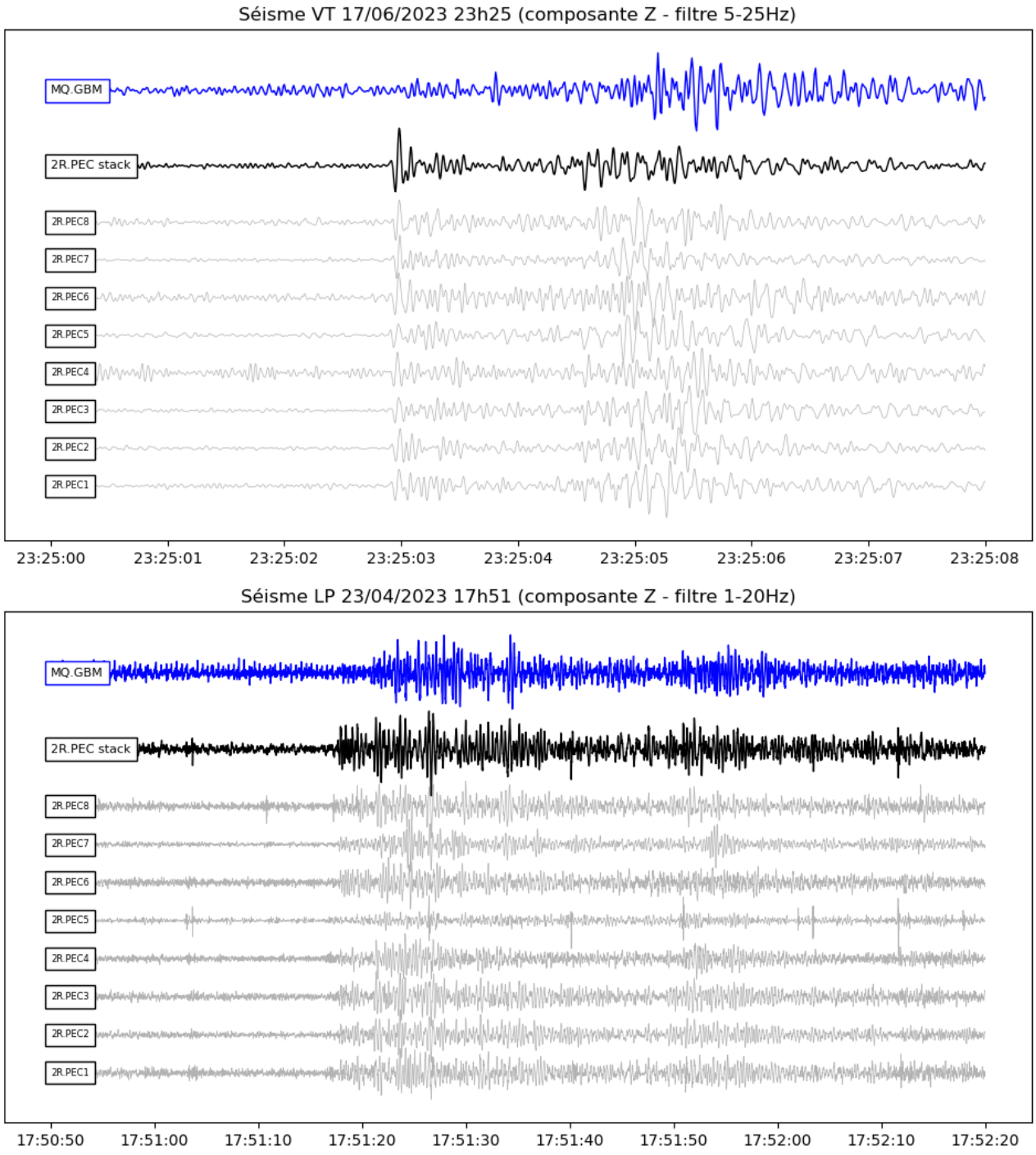


Figure 58. Exemples d'évènements enregistrées par le réseau temporaire de nodes de l'antenne PEC (Pécoul) pour un séisme volcano-tectonique (haut) et un séisme longue-période (bas) du catalogue OVSM. La trace noire est la moyenne des traces de chaque node et la trace en bleu est celle de la station permanente la plus proche de cette antenne.

D'autre part, une analyse du niveau de bruit a été réalisée sur les 24 stations des 3 antennes à l'aide d'une version modifié du code « CLB noise analysis » utilisé pour les stations permanentes du Réseau Large Bande Permanent (RLBP) dans l'hexagone. La **Figure 59** illustre le résultat de cette analyse pour un node de l'antenne LAM et la comparaison avec la même analyse menée sur les données de la station permanente LAM située à proximité. D'une manière générale, le niveau de bruit enregistré aux nodes des antennes est très similaire à celui enregistré aux stations permanentes pour les fréquences supérieures à 0,2 Hz. Ce niveau de bruit est généralement assez élevé comparativement aux abaques des New Low Noise Model et New High Noise Model (Peterson (1993), courbes grises sur la **Figure 59**) du fait des conditions météo venteuses sur les flancs du volcan et de

l'interaction de la houle océanique avec les côtes de l'île. Aux fréquences inférieures à 0,2 Hz le niveau de bruit enregistré par les nodes correspond au bruit instrumental de leurs géophones. Néanmoins il est possible d'enregistrer des signaux sismiques exploitables jusqu'à des fréquences de l'ordre de ~0,05 Hz pour des évènements de forte amplitude. Les nodes de chaque antenne étant situés relativement proches les uns des autres (quelques dizaines de mètres), il est possible de moyenner les signaux des 8 nodes de chaque antenne, ce qui permet de diminuer de ~20 dB le niveau de bruit pour des fréquences supérieures à 2 Hz comparativement au niveau de bruit d'un node seul (cf. **Figure 58**).

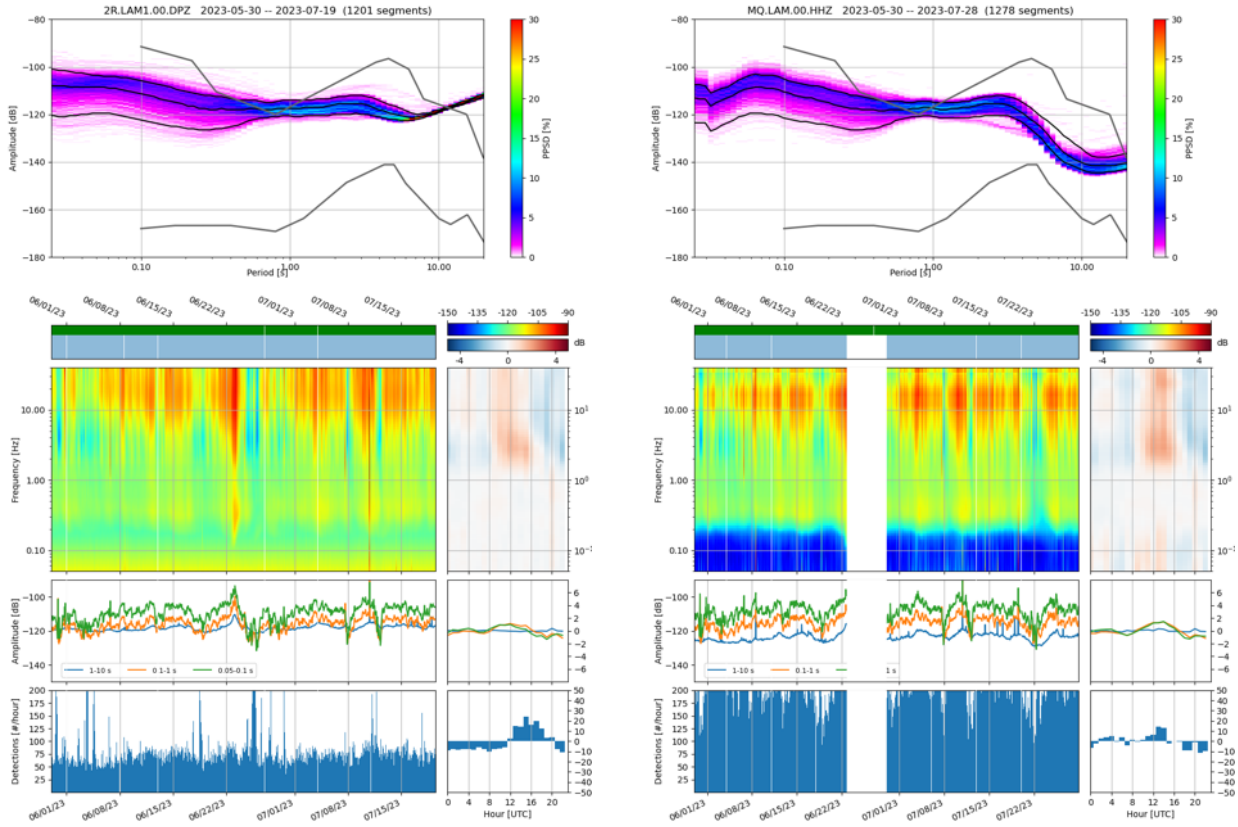


Figure 59. Analyse du niveau de bruit sur la période du 30 mai 2023 au 19 juillet 2023 pour le node 1 de l'antenne LAM (gauche, station 2R.LAM1) et la station permanente LAM de l'OVSM (droite, station MQ.LAM). Chaque figure représente la densité de probabilité de la densité spectrale de puissance (haut), le spectrogramme et sa variation relative en fonction de l'heure du jour (milieu) et le nombre de détections horaires d'arrivées impulsives via un algorithme de type STA/LTA ainsi que sa variabilité en fonction de l'heure du jour (bas).

Les données collectées pourront permettre de réaliser des relocalisations des séismes d'origine volcanique et tectonique afin d'affiner la position des foyers. D'autres approches d'analyses des propriétés du champ d'onde et de mesure des variations temporelles de la vitesse de propagation des ondes entre chaque couple d'antennes sont également envisagées.

Déploiement de 25 stations autour de la Caldeira

Lors du dernier mois du projet, l'ensemble des 25 nodes chargés disponibles ont été déployés autour de la Caldeira (**Figure 60**) avec un espacement d'environ 90 mètres. Cette fois, aucune rotation n'a été effectuée et les nodes ont fonctionné pendant ~30 jours jusqu'à leur arrêt. En effet, avec seulement 32 nodes au total, il était impossible d'effectuer une rotation de l'ensemble du dispositif comme lors des déploiements précédents.

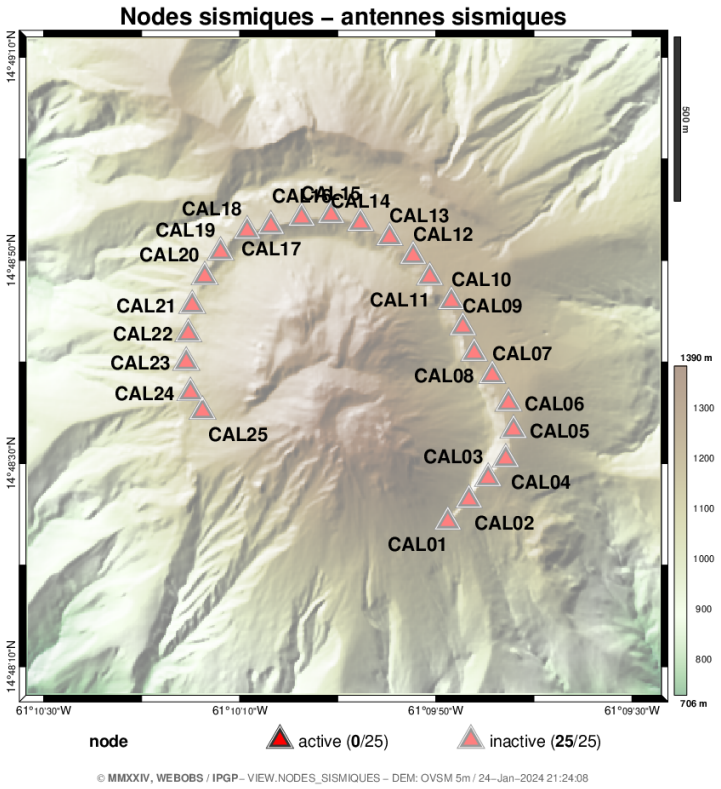


Figure 60. Stations temporaires autour de la Caldeira (CALxx).

De la même manière que pour les antennes GSA, LAM et PEC, les données ont été traitées par les mêmes scripts, un Sefran dédié a été généré (**Figure 61**) et des analyses manuelles et par algorithmes seront effectuées pour vérifier si des évènements non-visibles sur les signaux des stations permanentes peuvent être détectés sur les signaux des nodes.

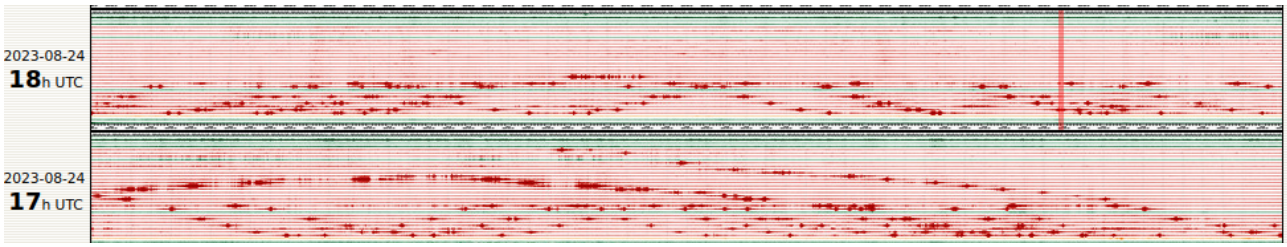


Figure 61. Sefran Caldeira avec un VT.

Ces 25 stations déployées autour de la Caldeira dans une architecture différente ouvrent également la possibilité de réaliser des études complémentaires à celles qui sont possibles avec le réseau de stations permanentes. Par exemple, les données de cette campagne seront utilisées pour réaliser une tomographie sismique par corrélation du bruit sismique ambiant qui apportera des informations sur la structure interne des dômes de la Montagne Pelée (analyses prévues en 2024). En fonction des résultats, un déploiement similaire pourrait être réalisé de manière annuel ou bisannuel pour pouvoir visualiser l'évolution de la structure interne du volcan.

Projet Irima

Le PEPR Risques (IRIMA) (Gestion intégrée des Risques pour des sociétés plus résilientes à l'ère des changements globaux) a pour objectif de formaliser une « science du risque » pour contribuer à l'élaboration d'une nouvelle stratégie de gestion des risques, des catastrophes et de leurs impacts dans le contexte de changements globaux, anthropiques et climatiques. L'approche choisie, holistique et intégrative des savoirs, fédère les géosciences, les sciences du climat et de l'environnement, l'ingénierie, les sciences des données et du numérique, ainsi que les sciences humaines et sociales.

Le PEPR est organisé autour de 6 axes : 1) Science et société (risques, résilience et développement de stratégies d'adaptation) ; 2) Data, modèles quantitatifs et algorithmes pour l'analyse des risques et un support à la prise de décision ; 3) Risques en montagne et risques côtiers ; 4) Risques en zones urbanisées et en zones industrielles ; 5) Risques en Outremer et zones intertropicales ; 6) Infrastructures et plateformes.

Anne Le Friant porte pour l'IPGP le projet ciblé Outre-mer (2,5 M€) sur les risques telluriques et hydrométéorologiques intenses et fréquents auxquels sont confrontées les populations d'outre-mer et les zones intertropicales. Le projet s'articule en 3 work packages. Le WP1 vise à développer une instrumentation novatrice en forage autour de la Montagne Pelée en Martinique pour l'OVSM pour faire face aux risques sismo-volcaniques et mieux reconstruire le passé éruptif et les paléo-écosystèmes et leurs relations aux aléas naturels. Le WP2 se focalise sur l'estimation des dommages et des impacts socio-économiques liés au risque tsunamis en appliquant les méthodologies à Mayotte (Océan Indien). Le WP3 s'intéresse aux risques hydro-climatiques dans le Pacifique, la gestion de crise cyclonique en Nouvelle-Calédonie et l'adaptation des îles coralliennes aux effets du changement climatique (érosion côtière) en Polynésie française.

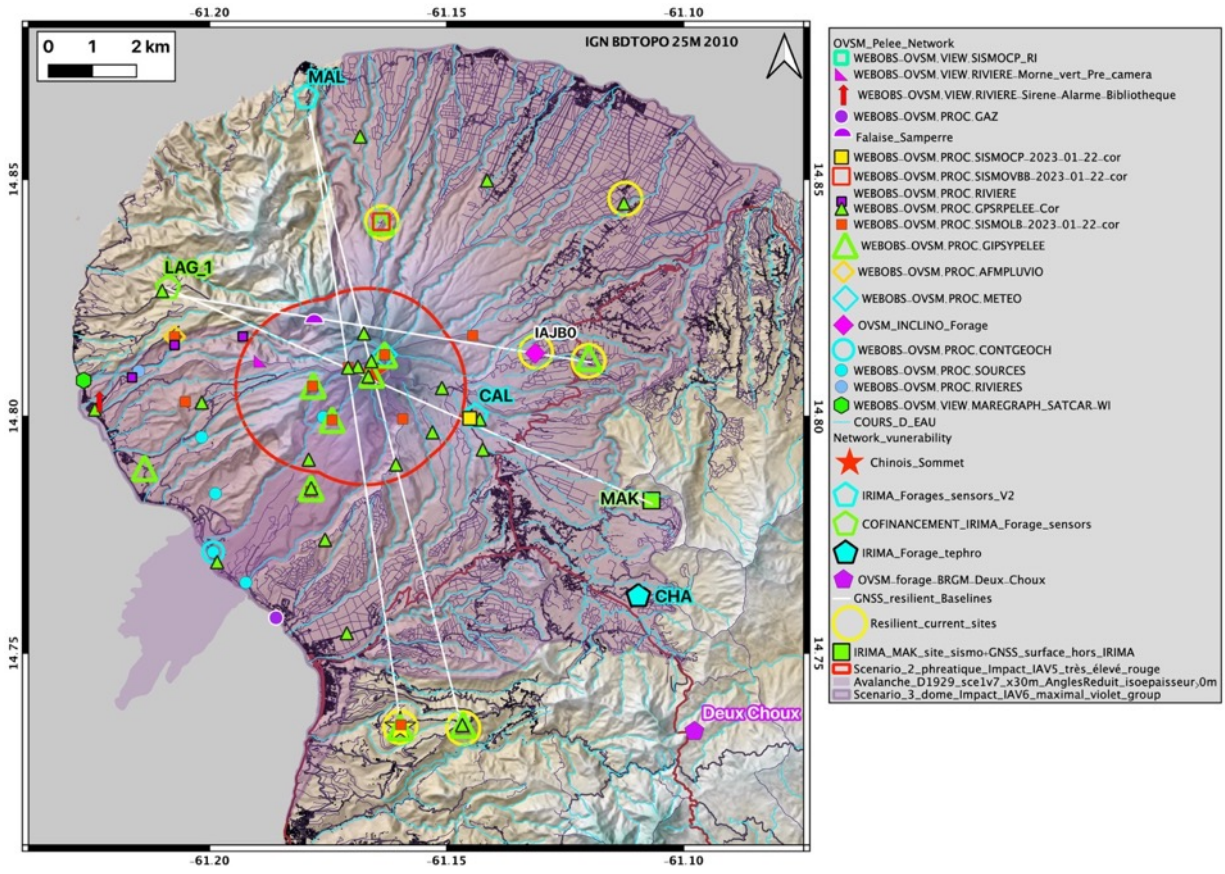


Figure 62. Réseau de surveillance de la Montagne Pelée avec les 2 forages instrumentés multiparamètres pour l'acquisition de nouvelles données d'observations sur les systèmes volcaniques et leurs racines magmatiques profondes (potentiels signaux précurseurs, réseaux résilients) et le site du forage carotté pour reconstruction de l'activité éruptive et des paléo-écosystèmes qui seront déployés dans le cadre du projet ciblé PC Outre-mer (Pilotage A. Le Friant, IPGP) dans le cadre du projet PEPR IRIMA (Pilotage : S. Boudya, D. Georges, G. Grandjean).

Références

Beauducel F., A. Peltier, A. Villié, W. Suryanto (2020a), Mechanical imaging of a volcano plumbing system from unsupervised GNSS modeling, *Geophys. Res. Lett.*, https://doi.org/10.1029/2020GL089419.

Beauducel F., D. Lafon, X. Béguin, **J.-M. Saurel**, A. Bosson, D. Mallarino, P. Boissier, C. Brunet, A. Lemarchand, C. Anténor-Habazac, A. Nercessian, A. A. Fahmi (2020b), WebObs: The volcano observatories missing link between research and real-time monitoring, *Frontiers in Earth Sciences*, https://doi.org/10.3389/feart.2020.00048.

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.

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.

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.

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

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.

Sano, Y., Wakita, H., & Williams, S. N. (1990). Helium-isotope systematics at Nevado del Ruiz volcano, Colombia: implications for the volcanic hydrothermal system. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 42(1-2), 41-52.

Sano, Y., Gamo, T., & Williams, S. N. (1997). Secular variations of helium and carbon isotopes at Galeras volcano, Colombia. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 77(1-4), 255-265.

Sano, Y., & Fischer, T. P. (2013). The analysis and interpretation of noble gases in modern hydrothermal systems. *The noble gases as geochemical tracers*, 249-317.

Sano, Y., Kagoshima, T., Takahata, N., Nishio, Y., Roulleau, E., Pinti, D. L., & Fischer, T. P. (2015). Ten-year helium anomaly prior to the 2014 Mt Ontake eruption. *Scientific reports*, 5(1), 13069.

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

Accès aux données de l'OVSM-IPGP

Le catalogue manuel et automatique de l'OVSM-IPGP est disponible et accessible librement par le web-service ws.ipgp.fr/fdsnws/event, voir https://doi.org/10.18715/MARTINIQUE.OVSM.

Les données sismologiques et GNSS sont accessibles librement sur le portail https://volobis.ipgp.fr.

Les traitements automatiques de données à l'observatoire sont en partie réalisés par le code numérique communautaire WebObs (Insu-CNRS Terre Solide) : https://ipgp.github.io/webobs.