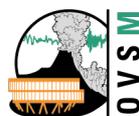




©OVSM-IPGP, 2019



## Sommaire

<b>I Présentation de l'observatoire</b>	4
<b>II Résumé</b>	5
<b>III Introduction</b>	8
<b>V Activité de la Montagne Pelée</b>	10
V. 1. Introduction	10
V. 2. Activité sismique de la Montagne Pelée	10
V. 3. Phénoménologie	19
V. 4. Déformation de la Montagne Pelée	22
V. 5. Suivi géochimique des sources thermales de la Montagne Pelée et de la rivière du Prêcheur	28
V. 6. Glissements de terrain et lahars	33
V. 7. Activité volcanique de l'arc des Petites Antilles	35
<b>VI Activité locale et régionale</b>	36
VI. 1. Contexte tectonique	36
VI. 2. Activité sismique tectonique	38
VI. 3. Sismicité ressentie	41
VI. 4. Déformation régionale	43
<b>VII Réseaux de surveillance et d'études</b>	45
VII. 1. Le réseau sismologique régional	45
VII. 2. Le réseau sismologique de Martinique	48
VII. 3. Les réseaux accélérométriques de Martinique	49
VII. 4. Le réseau de suivi des déformations	50
VII. 5. Le système de détection automatique des lahars de la rivière du Prêcheur	52
VII. 6. Le réseau de suivi géochimique de la Montagne Pelée	53
VII. 7. Interventions sur les réseaux de surveillance et de mesures en 2021	54
VII. 8. Évolution du système informatique en 2021	63
VII. 9. Archivage et distribution des données	64
<b>VIII. Activités diverses de l'OVSM</b>	65
VIII. 1. Formations, missionnaires et stagiaires	65
VIII. 2. Hygiène et sécurité	67
VIII. 3. Communications, colloques et publications	68
VIII. 4. Relations avec les autorités	69

<b>IX Projets et collaborations</b>	70
IX. 1. Collaboration avec l'OVSG, l'OVPF et l'équipe de Paris de l'IPGP	70
IX. 2. Collaboration régionale	71
IX. 3. Collaboration avec les universités	71
IX. 4. Projet PREST	72
<b>Bibliographie</b>	80

## I Présentation de l'observatoire

### Contacts

<i>Observatoire Volcanologique et Sismologique de Martinique – Habitation Blondel – Morne la rosette, 97250 SAINT-PIERRE – Martinique, FWI</i>
<i>Institut de Physique du Globe de Paris - UMS 3454 - 1, rue Jussieu - 75238 Paris Cedex 05 - France</i>
<b>Tél</b> + 596 (0) 596 78 41 41
<b>Fax</b> + 596 (0) 596 55 80 80
<a href="mailto:infos@ovmp.martinique.univ-ag.fr">infos@ovmp.martinique.univ-ag.fr</a>
<a href="http://www.ipgp.fr/fr/ovsm/observatoire-volcanologique-sismologique-de-martinique">http://www.ipgp.fr/fr/ovsm/observatoire-volcanologique-sismologique-de-martinique</a>
<b>Twitter</b> ObsMartinique – <b>Facebook</b> ObsVolcanoSismoMartinique

### Citation de ce rapport

Fontaine, F.R., J. Corbeau, D. Vaton et l'équipe de l'OVSM IPGP, Rapport d'activité 2021 de l'Observatoire Volcanologique et Sismologique de Martinique, Institut de Physique du Globe de Paris, mars 2022.

### Remerciements

Nous tenons à remercier la Collectivité Territoriale de Martinique, l'Institut National des Sciences de l'Univers et le Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche pour leur soutien financier et logistique.

Ce rapport a été rédigé par F.R. Fontaine, J. Corbeau, D. Vaton et toute l'équipe de l'observatoire.

## Personnel de l'OVSM au 31 décembre 2021 (9 permanents et 3 CDD)

Fabrice R. <b>Fontaine</b>	Directeur et Responsable Scientifique Géophysique	IPGP/MESR
Jordane <b>Corbeau</b>	Directrice-Adjointe / Géophysique	IPGP/MESR
Alice <b>Jalta</b>	Manager du projet PREST	CDD IPGP
Julien <b>Koziol</b>	Ingénieur Instrumentation PREST	CDD IPGP
Samantha <b>Phemius</b>	Gestionnaire Comptable et Financière	IPGP/MESR
Cyril <b>Vidal</b>	Responsable Informatique Ingénieur Système-Réseau	CNRS
Jean-Marc <b>Lavenaire</b>	Technicien Informatique	CNRS
Doris <b>Vaton</b>	Responsable Technique Ingénieure Électronique et Instrumentation	CDD IPGP
Frédéric <b>Jadelus</b>	Technicien Électronique et Instrumentation	CNRS
David <b>Melezan</b>	Technicien Électronique et Instrumentation ACMO Hygiène et Sécurité	IPGP/MESR
Jean-Gilles <b>Gabriel</b>	Technicien Bâtiment	CTM
Valérie <b>Minin</b>	Agent d'entretien	CTM

## Equipe de direction des Observatoires Volcanologiques et Sismologiques à Paris

Marc <b>Chaussidon</b>	Directeur de l'IPGP
Antoine <b>Charlot</b>	Directeur Général des Services
Anne <b>Le Friant</b>	Directrice-adjointe en charge des observatoires
Jean-Christophe <b>Komorowski</b>	Responsable scientifique des observatoires volcanologiques et sismologiques
Jean-Marie <b>Saurel</b>	Responsable opérationnel des observatoires volcanologiques et sismologiques
Arnaud <b>Lemarchand</b>	Directeur-adjoint en charge de l'instrumentation

## II Résumé

### Activité de la Montagne Pelée

Depuis avril 2019, l'activité sismique est en augmentation. Elle présente à la fois des séismes superficiels et des séismes profonds (environ 15 km de profondeur) sous l'édifice de la Montagne Pelée, avec une intensification des séismes superficiels à partir de novembre 2020 et l'apparition de signaux sismiques de type trémor, hybride et longue période, témoignant de mouvements de fluides en surpression dans des fractures. Une zone de végétation dégradée sur le flanc sud-est de la Montagne Pelée est observée depuis le mois de décembre 2020. La présence d'une zone de dégazage en mer à faible profondeur entre Saint Pierre et le Prêcheur a été signalée à l'observatoire le 30 juin 2021. De nombreux points d'émissions dans le fond marin libèrent de façon continue mais variable des trains de bulles de gaz à faible température. Les prélèvements de gaz par l'OVSM IPGP sont en cours d'analyse afin de déterminer la relation éventuelle de ce dégazage sous-marin avec l'activité de la Montagne Pelée. Ces observations suggèrent une augmentation de l'activité du système hydrothermal au sein de la Montagne Pelée.

Cependant, nous n'assistons pas :

- À des variations majeures d'autres paramètres géophysiques tels que les déformations à l'échelle du volcan,
- À des variations majeures de paramètres physico-chimiques des sources thermales ni à l'apparition de fumerolles.

Ainsi, sur la base des observations de l'OVSM IPGP enregistrées au cours du mois de novembre 2020 et résumées dans le [communiqué de presse](#) de l'OVSM IPGP du 4 décembre 2020, le niveau d'alerte est passé à **JAUNE=Vigilance** depuis le 4 décembre 2020, en accord avec le système de niveaux mis en place avec la Préfecture.

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

### Communication

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

### Activité sismique régionale

Concernant l'activité sismique régionale, **880** séismes d'origine tectonique ont été enregistrés en 2021, parmi lesquels **5 séismes ont été ressentis** en Martinique tandis que 6 séismes l'avaient été en 2020. La magnitude la plus élevée pour les séismes tectoniques ressentis en 2021 est celle du séisme du 26 mars, au large de la Guadeloupe, avec une valeur calculée de 6.

### Instrumentation

La modernisation du réseau sismologique de la Montagne Pelée a été effectuée pour 4 stations initialement installées entre 1976-1979. Le réseau de stations du suivi des déformations a été enrichi de 3 nouvelles stations GNSS et les stations accélérométriques du barrage de la MANZO ont été remises en fonctionnement. Les interventions de contrôle préventif, de maintenance, et d'entretien ont été effectuées tout au cours de l'année afin d'assurer le bon fonctionnement des différents réseaux de surveillance (voir détails **section VII**).

### Personnel

**Julien Koziol**, ingénieur en instrumentation, a pris ses fonctions le 1er juillet 2021 dans le cadre du projet PREST (*Plateforme Régionale de Surveillance Tellurique*). Il assure la mise en place de la plateforme marine et l'établissement d'une première carte bathymétrique de la côte caribéenne Nord de la Martinique.

**Doris Vaton**, responsable technique et ingénieure en électronique et instrumentation, a pris ses fonctions le 15 septembre 2021 en remplacement de Benoît Zimmermann. Elle assure la poursuite des activités techniques concernant le réseau d'instrumentation de l'OVSM au sein de l'équipe technique.

**Jordane Corbeau**, chercheur géophysicienne, a obtenu un poste permanent de physicienne-adjointe du Conseil National des Astronomes et Physiciens (CNAP) et a pris ses fonctions le 1er septembre 2021 à l'OVSM.

### Conventions

La convention cadre entre la **CTM**, l'**IPGP** et le **CNRS-INSU** a été signée le 21 octobre 2021. Cette convention concerne la réalisation d'actions de recherche et de service public pour l'observation, la connaissance et la gestion des risques sismiques, volcaniques et de tsunamis en Martinique.

Une convention relative à la mise en œuvre de travaux urgents de remise en état du système de détection automatique des lahars exploité par l'OVSM-IPGP sur la commune du Prêcheur suite aux derniers lahars qui l'ont endommagé a été signée en mai 2021 entre la DEAL et l'IPGP.

### Divers

Concernant la pandémie associée au COVID-19, aucun membre de l'OVSM-IPGP n'a été contaminé par la COVID-19 en 2021, et un protocole strict a été suivi afin d'éviter toute contamination. Cependant, certaines interventions ont dû être repoussées en raison de la crise sanitaire.

La crise sociale en Martinique de fin d'année 2021 a nécessité d'effectuer du télétravail pour certains membres de l'équipe.

### III Introduction

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

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

- ❖ Observation et surveillance du volcan actif de la Montagne Pelée ;
- ❖ Observation et analyse de la sismicité locale et régionale ;
- ❖ Participation à l'alerte montante du système d'alerte aux tsunamis, qui est coordonnée à l'échelle de la Caraïbe par l'UNESCO ;
- ❖ Maintenance du système de détection automatique de lahars de la rivière du Prêcheur;
- ❖ Information des autorités responsables de la protection des personnes et des biens;
- ❖ Participation à des travaux de recherche fondamentale et appliquée dans le domaine des Sciences de la Terre, en géophysique, géologie, et géochimie ;
- ❖ Information préventive et divulgation des connaissances dans les domaines du risque volcanique, du risque sismique, et des risques liés aux tsunamis ;
- ❖ Coopération avec la Collectivité Territoriale de Martinique et les organismes régionaux : Université des Antilles – UA ; Seismic Research Centre – SRC à Trinité et Tobago ; Observatoire Volcanologique de Montserrat – MVO ; Bureau des Mines et de l'Energie – BME en Haïti ; Centro Nacional de Investigacion Sismica – CENAIIS à Cuba ; Bureau de Recherche Géologique et Minière – BRGM, Institut de Recherche pour le Développement -IRD, etc. ;
- ❖ Collaboration étroite et permanente avec l'Observatoire Volcanologique et Sismologique de Guadeloupe – OVSG, et l'Observatoire volcanologique du Piton de la Fournaise – OVPF qui, comme lui, sont des observatoires de l'IPGP.

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

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

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

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

## V Activité de la Montagne Pelée

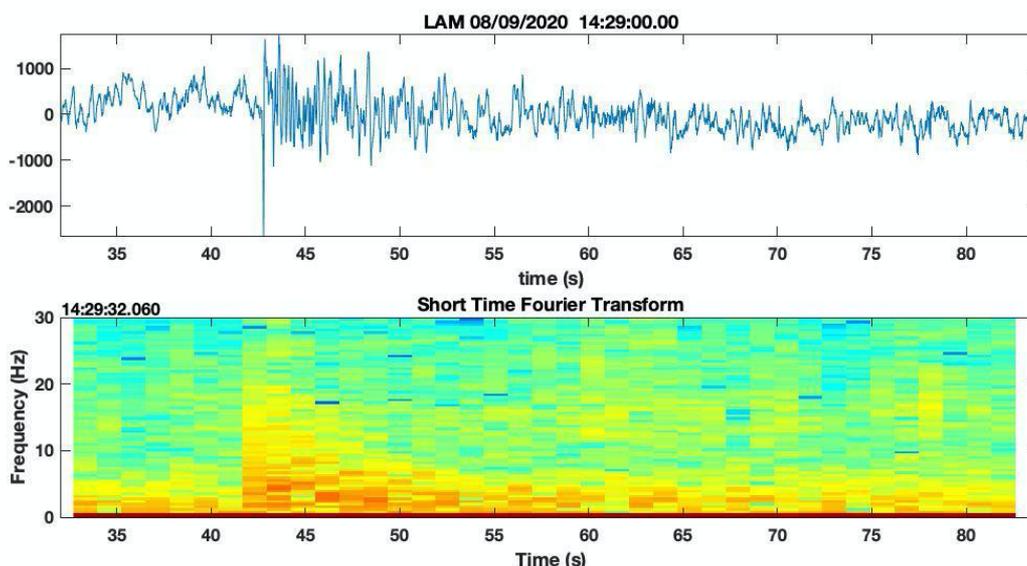
### V. 1. Introduction

La Montagne Pelée est un stratovolcan 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, et au moins 34 éruptions ont eu lieu lors des 24 000 dernières années (Michaud-Dubuy et al., 2021). Les 4 dernières périodes éruptives de la Montagne Pelée sont les suivantes :

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

### V. 2. Activité sismique de la Montagne Pelée

Un exemple de séismes de type volcano-tectonique (événements caractérisés par un signal contenant des hautes fréquences jusqu'à plus de 15 Hz, et qui sont associés à des processus de microfracturation dans l'édifice volcanique), aussi appelé VT, est représenté à la **Figure 1**.

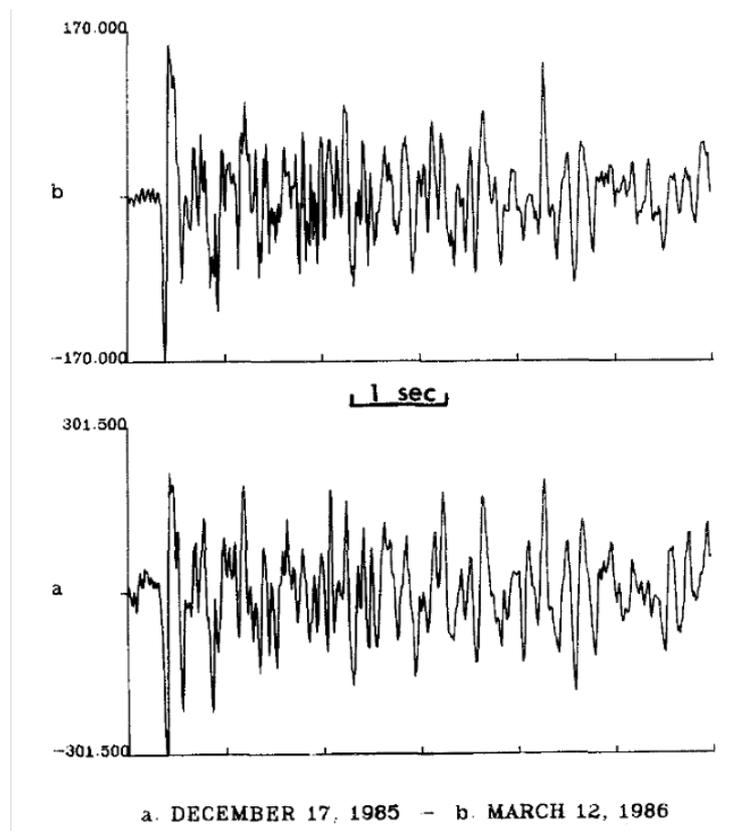


**Figure 1.** (Haut) Exemple de sismogramme d'un séisme de type VT de type 1 enregistré le 8 septembre 2020 à 14h29 (TU) au niveau de la station large bande LAM installée sur la Montagne Pelée depuis fin 2005. L'axe vertical représente la vitesse de déplacement du sol (en counts) selon la direction verticale.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

Boudon et al. (2005) indiquent une crise sismique de 55 événements en 6 jours entre octobre et novembre 1980. Cette crise est corrélée à un important glissement de terrain se produisant en amont de la Rivière du Prêcheur et à des coulées de boue.

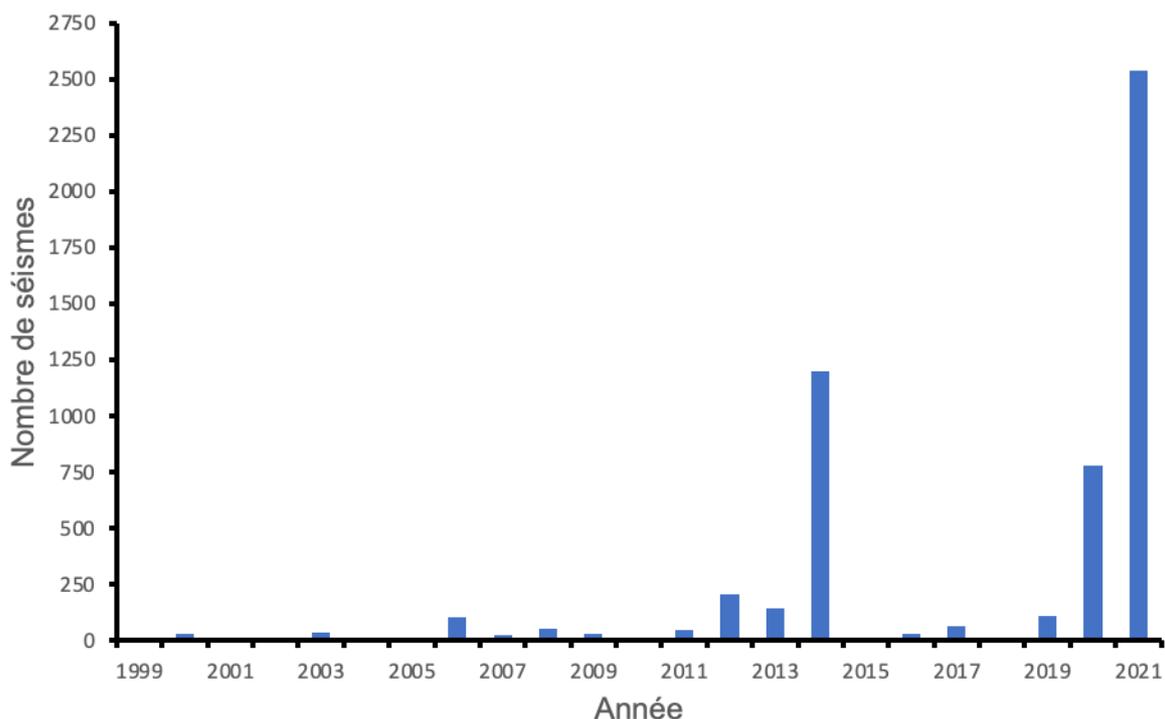
De décembre 1985 à juin 1986, une seconde crise sismique avec des séismes de type VT provenant d'une source peu profonde est détectée (Hirn et al., 1987) au niveau de la Montagne Pelée. La détection de ces séismes fut possible grâce au déploiement de sismomètres sur le volcan. La présence dans les sismogrammes de 1976 de séismes similaires est suggérée par Hirn et al., (1987).

Les séismes VT observés depuis 1976 (**Figure 2**) sont observés encore aujourd'hui avec le réseau sismique de l'OVSM IPGP. Ils forment un type de séisme VT appelé VT de type 1 par la suite dans le texte. Il est intéressant de noter la similarité des enregistrements présentés aux **Figures 1** (2020) et **2** (1985 et 1986).



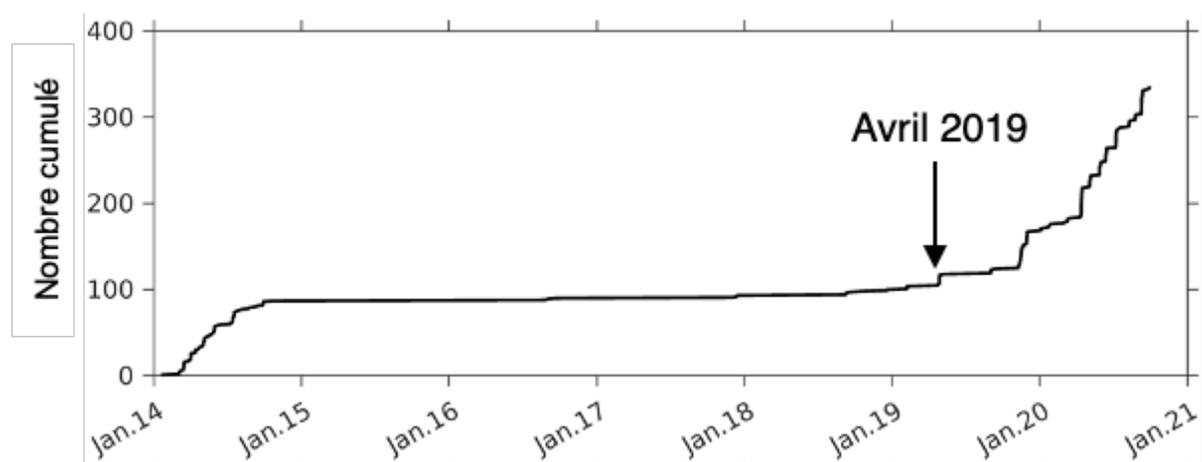
**Figure 2.** Sismogrammes de deux séismes VT de type 1 enregistrés le 17 décembre 1985 et le 12 mars 1986 à la station sismique LAM située au Morne La Croix au niveau de la Montagne Pelée. D'après Hirn et al. (1987). L'axe vertical représente la vitesse de déplacement du sol selon la direction verticale.

La sismicité enregistrée par les réseaux de surveillance entre le 1<sup>er</sup> janvier 1999 et le 1<sup>er</sup> janvier 2020 est généralement faible, avec une valeur médiane de 27 tremblements de terre par an (**Figure 3**). Nous remarquons la présence d'un essaim de sismicité en 2014 à la suite d'un séisme d'origine tectonique de magnitude 6.5, largement ressenti en Martinique (intensité atteignant IV-V), ayant eu lieu le 18 février 2014 à 9h27 (TU) et à 210 km à l'est de la Martinique. Cet essaim de séismes de type VT pourrait être en grande partie associé à ce fort séisme tectonique et à ses répliques.

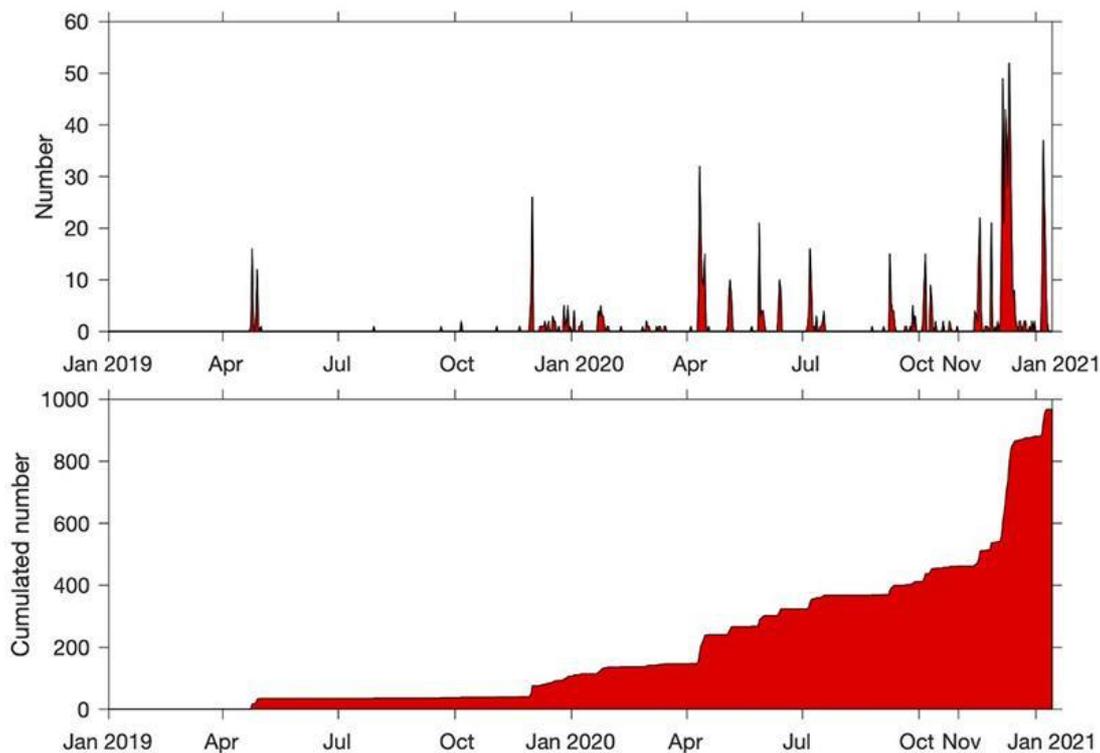


**Figure 3.** Évolution du nombre quotidien de tremblements de terre de type volcano-tectoniques (VT) enregistrés à l’OVSM IPGP du 1<sup>er</sup> janvier 1999 au 1<sup>er</sup> janvier 2022.

La **Figure 4** montre l’évolution du nombre cumulé de séismes de type VT depuis le début du mois de janvier 2014. Grâce à l’utilisation depuis la mi-2020 d’un traitement automatique précis des données sismiques, nous avons pu vérifier et confirmer la présence de ces événements. Alors que peu de séismes de type volcano-tectonique sont observés entre le 1<sup>er</sup> janvier 2015 et le 1<sup>er</sup> avril 2019, une augmentation est constatée à partir d’avril 2019 et le taux de sismicité augmente plus fortement à partir de novembre 2019 (**Figure 5**). Une analyse fine de la sismicité depuis 2014 avec deux approches complémentaires (détections automatiques et manuelles) montre qu’entre le 1<sup>er</sup> janvier 2015 et le 1<sup>er</sup> avril 2019 le niveau de base de la sismicité de type VT était de 24 séismes par an, soit 2 séismes par mois avec un écart-type de 6. En avril 2019, 34 séismes de type VT sont détectés.



**Figure 4.** Augmentation du nombre cumulé par jour de séismes VT de type 1 observée à partir d’une recherche automatique des séismes VT détectés à la station sismique LAM depuis janvier 2014. L’analyse se porte sur une catégorie spécifique de séismes de type VT (un même séisme qui se répète dans le temps), et qui traduit bien la tendance de l’activité globale de la Montagne Pelée. Traitement des données : A. Burtin (IPGP).

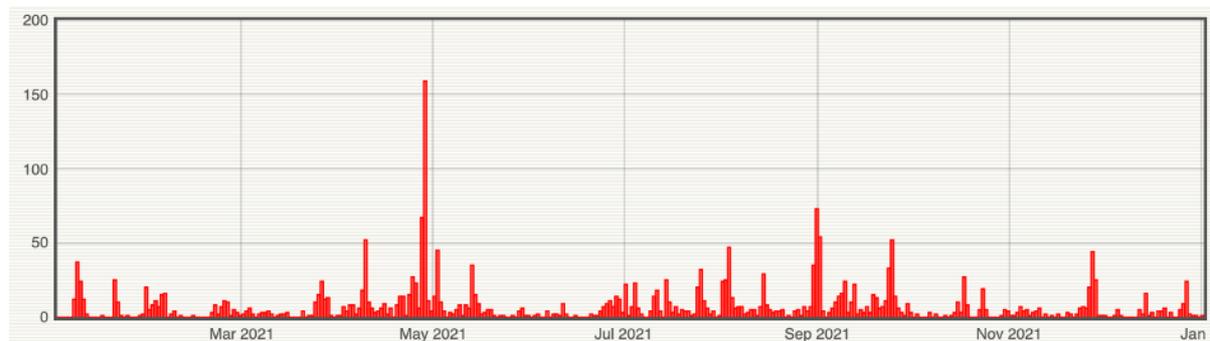


**Figure 5.** Graphiques montrant le nombre quotidien de tremblements de terre volcano-tectoniques (VT) enregistrés (en haut) et le nombre cumulé de tremblements de terre VT (en bas) du 1er janvier 2019 au 14 janvier 2021 au niveau de la Montagne Pelée. Les tremblements de terre VT proviennent du catalogue manuel de l’OVSM IPGP ([ws.ipgp.fr/fdsnws/event](https://ws.ipgp.fr/fdsnws/event), <https://doi.org/10.18715/MARTINIQUE.OVSM>).

Une sismicité volcanique accrue est observée à partir d’avril 2019 et est située à 4-5 km en dessous du sommet (**Figure 6**). Une plus forte augmentation est enregistrée entre le 2 et le 15 décembre 2020 avec 316 tremblements de terre VT au cours de cette période.

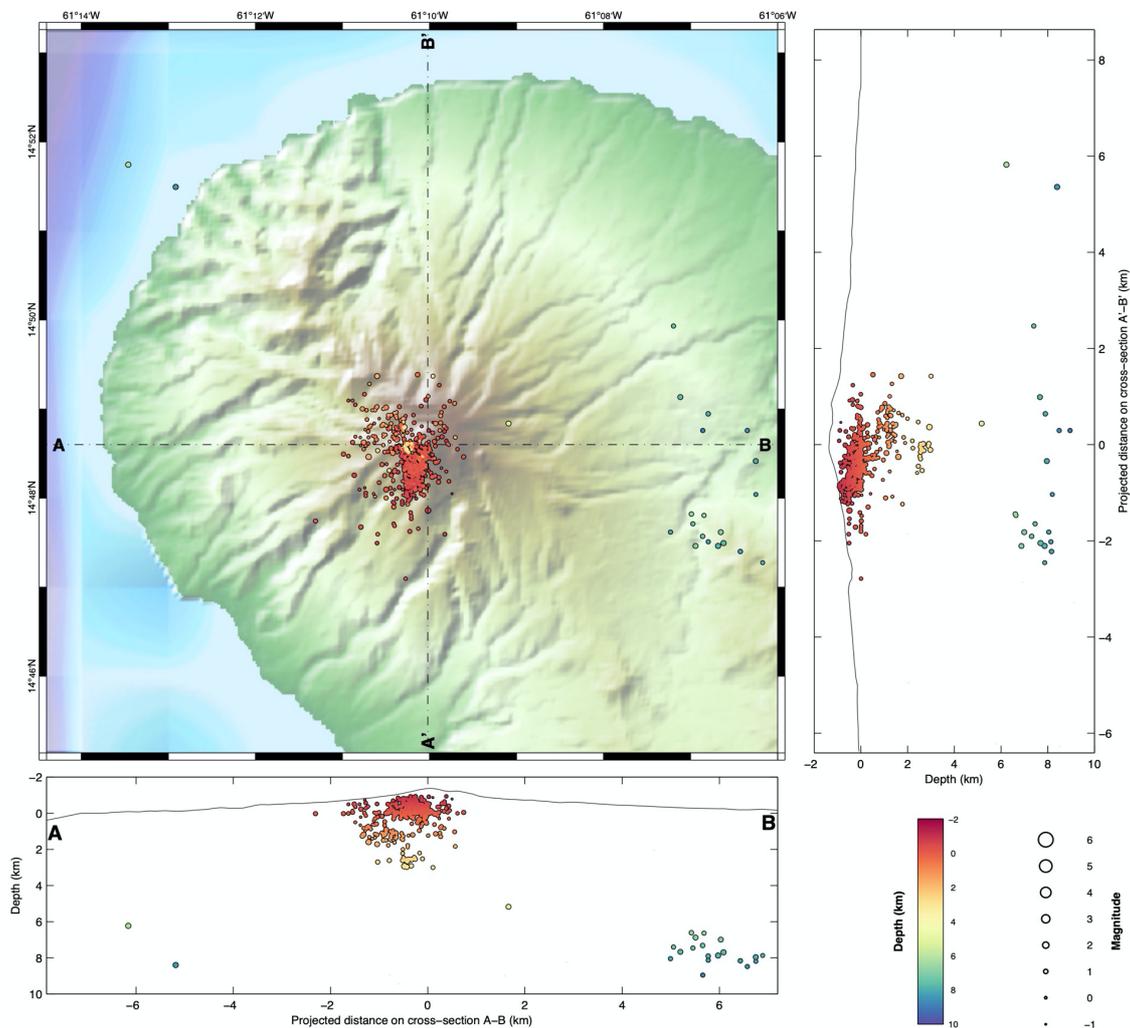
Au cours de l’année 2020, l’OVSM-IPGP a détecté au moins **793 séismes de type volcano-tectonique (VT)**, événements caractérisés par un signal contenant des hautes fréquences et associés à des processus de micro-fracturation dans l’édifice volcanique. Ces séismes, de magnitude inférieure à 2.1, n’ont pas été ressentis par la population.

D’avantage de séismes ont été détectés au cours de l’année 2021, avec au moins **2539 séismes de type volcano-tectonique (VT)**. Ces séismes, de magnitude inférieure ou égale à 1.5, n’ont pas été ressentis par la population.



**Figure 6.** Nombre journalier de séismes de type volcano-tectonique détectés du 1<sup>er</sup> janvier 2021 au 1<sup>er</sup> janvier 2022. L’axe vertical représente le nombre de séismes.

Certains de ces événements ne sont pas localisables étant donné leur faible amplitude. Parmi ces 2539 séismes de type VT, **601 ont pu être localisés** sous la Montagne Pelée, entre 0 et 10 km de profondeur sous la surface (**Figure 7**). En effet, entre le 27 et le 28 novembre l'OVSM-IPGP a enregistré un essaim de 42 séismes volcano-tectoniques de magnitude inférieure ou égale à 1.2, principalement localisés à environ 3 km au sud d'Ajoupa-Bouillon entre 6.9 et 9.5 km de profondeur sous la surface. Le 5 décembre, l'OVSM-IPGP a enregistré en plus de l'activité volcano-tectonique superficielle habituelle 2 séismes volcano-tectoniques de magnitude variant entre 1.1 et 1.2, principalement localisés à environ 4.5 km à l'ouest-sud-ouest de Grand'Rivière entre 7.2 et 9.4 km de profondeur sous la surface. L'observation d'un tel essaim de séismes de profondeur intermédiaire est un nouveau changement constaté au niveau de l'activité du volcan qui pourrait être associé à un changement de pression et à de la fracturation à l'intérieur et à proximité de l'édifice volcanique. Aucun de ces séismes n'a été ressenti par la population.



**Figure 7.** Carte de localisation de la sismicité de la Montagne Pelée en 2021 et coupes nord-sud et est-ouest montrant la localisation en profondeur des hypocentres. La majeure partie de la sismicité est située à moins de 4 km de profondeur sous la surface.



## RAPPORT ANNUEL OVSM - IPGP - 2021

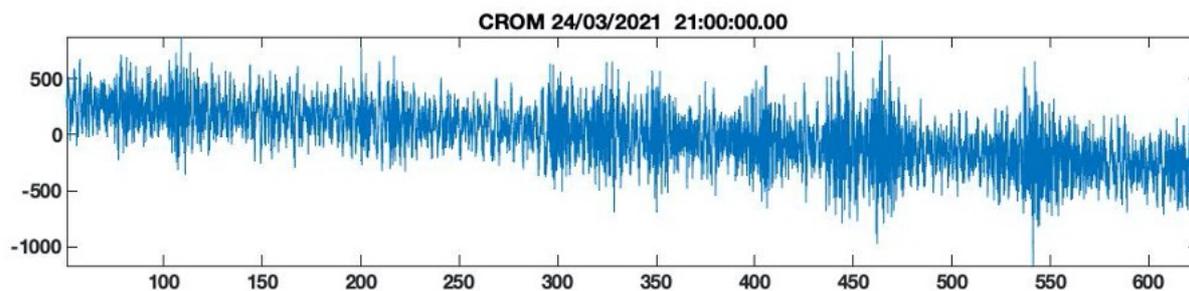
Cette année, l'OVSM-IPGP a observé 23 signaux sismiques de type hybride, 14 de type longue période et 7 de type trémor (**Tableau 1** et **Figure 10**). Ces signaux de type trémor et longue période contenant des basses fréquences sont associés à la présence et migration de fluides du système hydrothermal (gaz, eaux hydrothermales) dans l'édifice volcanique. Le tableau ci-dessous montre l'évolution des différents types de signaux sismiques lors de 2021.

Nombre de séismes	Janvier 2021	Février 2021	Mars 2021	Avril 2021	Mai 2021	Juin 2021
Volcano-tectonique	162	109	120	533	199	103
Longue période	5	1	0	0	0	0
Hybride	2	1	0	13	0	1
Trémor	3	2	1	0	0	0

Nombre de séismes	Juillet 2021	Août 2021	Septembre 2021	Octobre 2021	Novembre 2021	Décembre 2021
Volcano-tectonique	243	359	363	102	163	97
Longue période	1	0	6	0	1	0
Hybride	0	1	5	0	0	0
Trémor	0	0	0	0	1	0

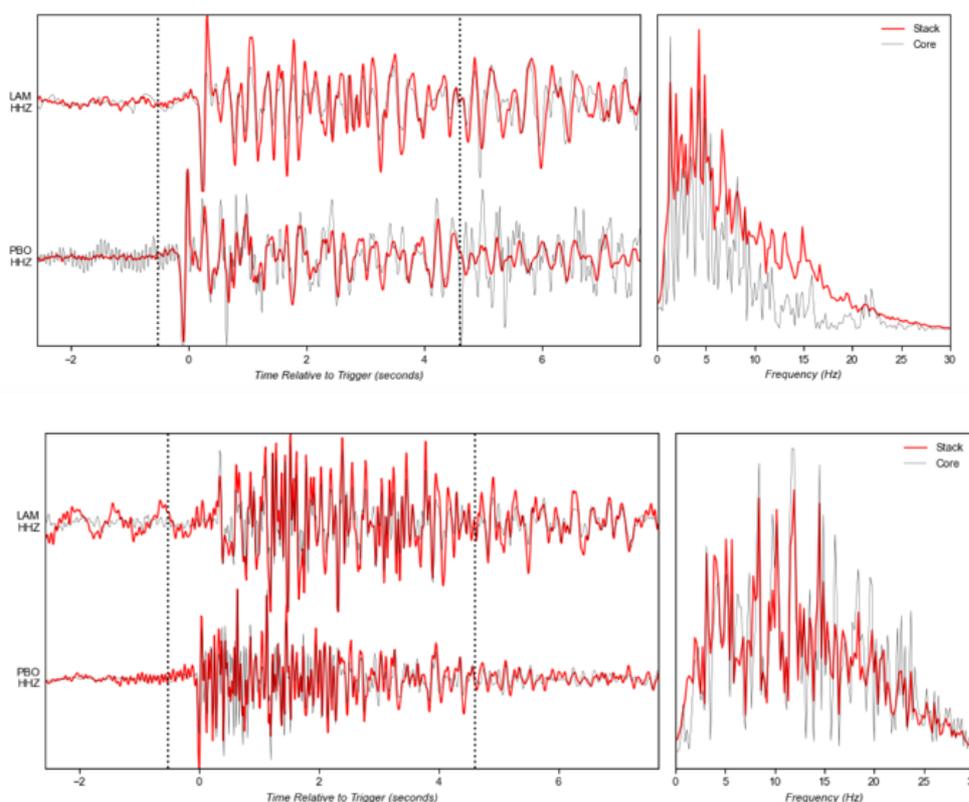
**Tableau 1.** Répartition des types de signaux sismiques détectés en 2021 par l'OVSM-IPGP.

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



**Figure 10.** Exemple de signal de type trémor enregistré en 2021 par l'OVSM-IPGP. Sismogramme de la composante verticale de la station CROM montrant un signal de type trémor volcanique enregistré le 24 mars 2021 par plusieurs sismomètres du réseau sismique de la Montagne Pelée. L'axe vertical représente l'amplitude en counts.

Plusieurs familles de séismes de type VT sont observées au niveau de la Montagne Pelée (Figures 11 à 13 et Tableau 2).



**Figure 11.** Comparaison des sismogrammes (à gauche) et amplitudes spectrales (à droite) de séismes de type VT1 (en haut) et VT5 (en bas) détectés par le code RedPy (Hotovec-Ellis et Jeffries, 2016) à partir de deux stations (PBO et LAM) du réseau sismique de la Montagne Pelée. Noter le contenu de plus hautes fréquences des séismes de type VT5 que les séismes de type VT1. Ces derniers montrent une amplitude plus forte pour les signaux de basses fréquences.

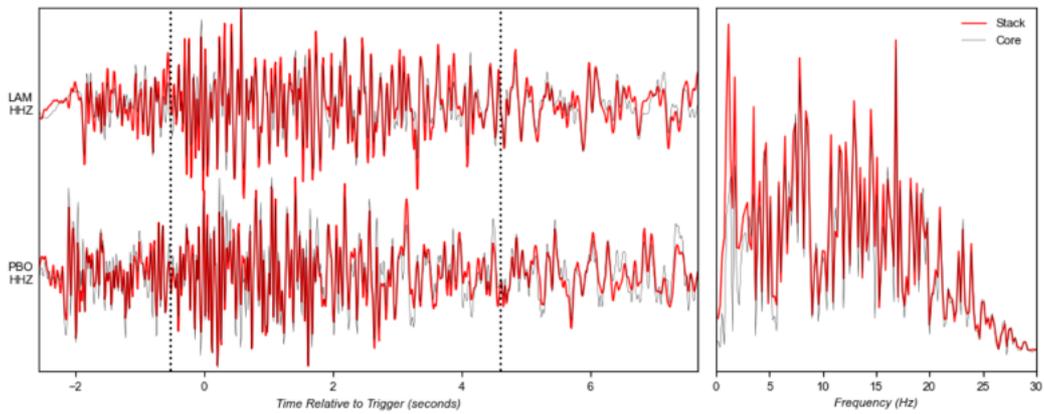


Figure 12. Sismogrammes (à gauche) et amplitudes spectrales (à droite) d'un séisme de type VT8 de l'essai à environ 3 km au sud d'Ajoupa-Bouillon entre 6.9 et 9.5 km de profondeur sous la surface, détecté par RedPy.

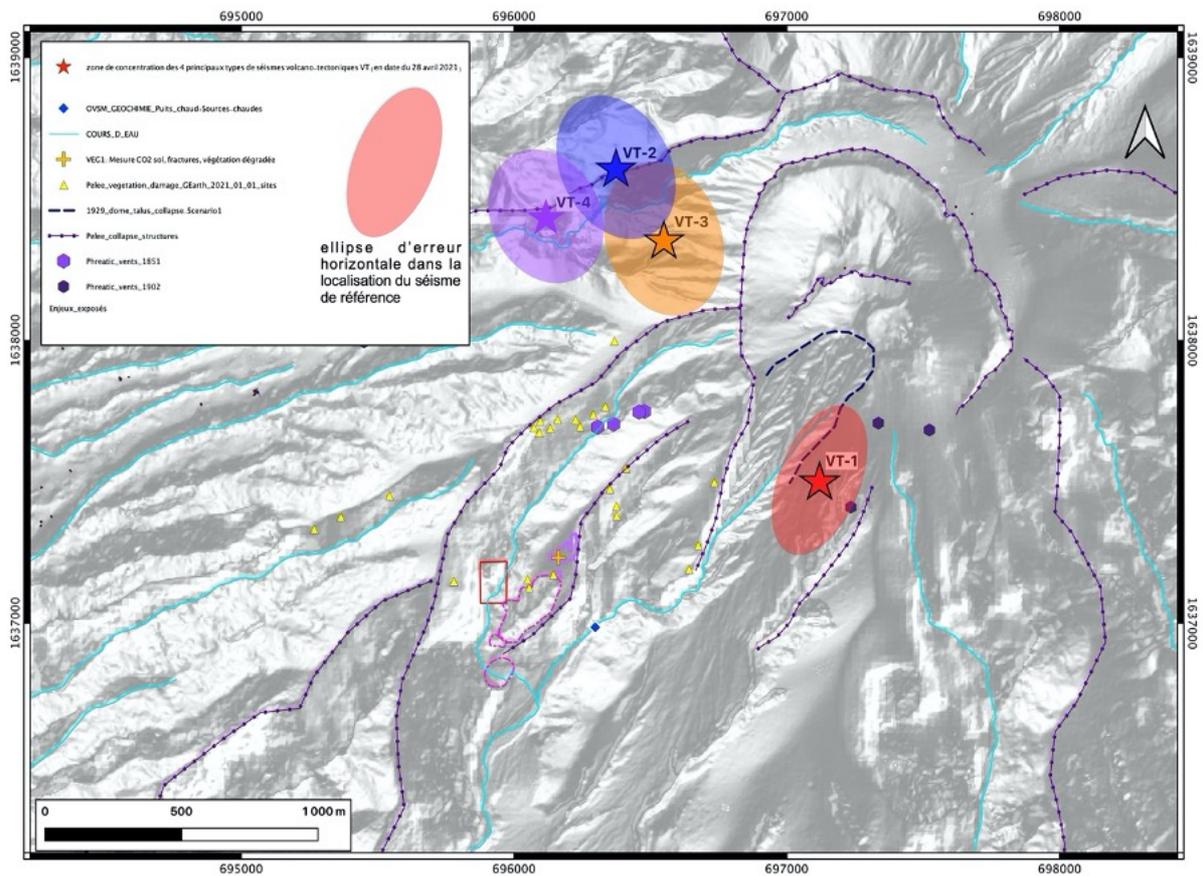


Figure 13. Localisation des séismes VT de type VT1 à VT4.

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

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

### V. 3. Phénoménologie

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 (VEG1). 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.

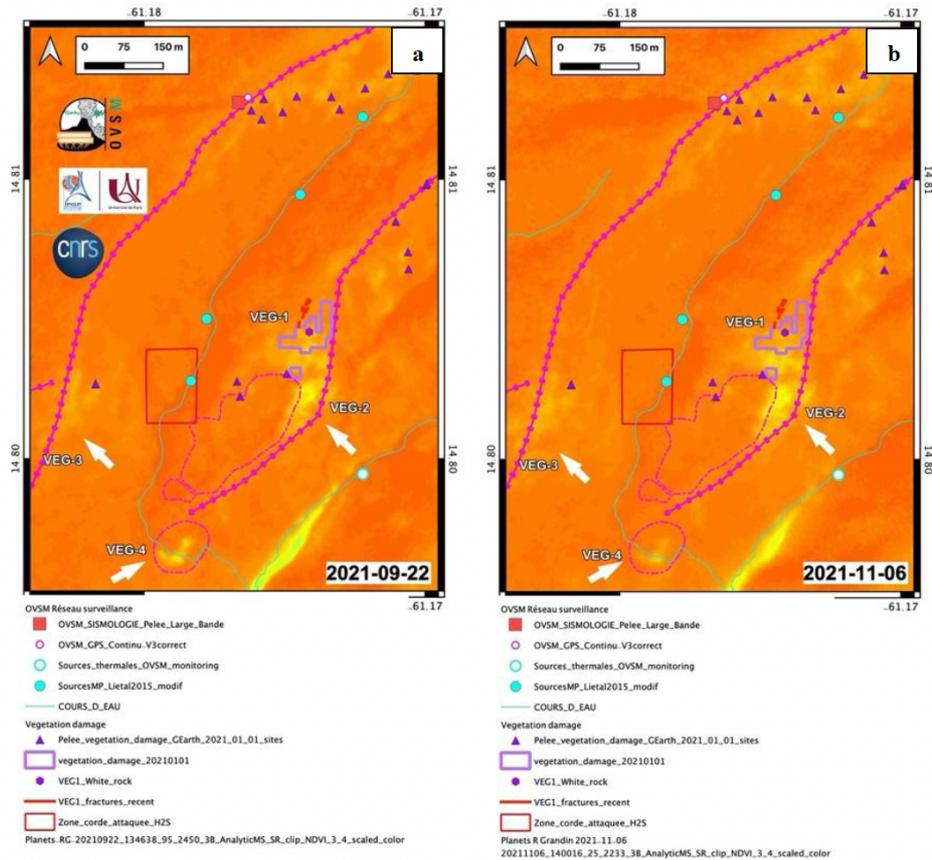
La mission de mesures de gaz au niveau de cette zone de végétation détériorée réalisée le 8 février 2021 montre la présence d'un dégazage diffus et passif en dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>, un gaz inodore et incolore) atteignant localement des concentrations maximales de 5000 à 7800 ppm. Des valeurs plus faibles ont été observées sur cette zone VEG1 avec le même type de capteur le 5 mars 2021 avec des concentrations de l'ordre de 400 à 800 ±100 ppm, ainsi que lors de la mission du 11 mai 2021 avec des concentrations moyennes de 407 ppm et de la mission du 20 juillet 2021 avec des concentrations inférieures à 700 ppm. Au cœur de la zone de végétation la plus détériorée, des fractures de 20 à 60 cm de largeur et de 2 à 3 m de profondeur sont visibles au sol (**Figure 14**) et peuvent être suivies sur plusieurs dizaines de mètres. Certaines de ces fractures sont clairement anciennes mais d'autres, très franches et dans lesquelles la végétation morte s'est affaissée pourraient s'être formées très récemment bien que leur âge ne soit pas connu. Il n'y a aucune fumerolle, émission de vapeur d'eau, ou de gaz qui s'échappent visiblement d'un orifice ou d'une fissure. Des marqueurs au sol ont été installés le 5 mars 2021 autour des fractures les plus importantes de manière à pouvoir suivre leur évolution au cours du temps. Lors de la mission au niveau de VEG1 le 20 juillet 2021, la mesure des marqueurs au sol qui avaient été installés de part et d'autre de fractures le 5 mars 2021 n'a pas révélé de déformation significative.



**Figure 14.** Survol hélicoptère (Sécurité Civile Dragon 972) le 2020-12-29, vue depuis le sud en direction du sommet de la Montagne Pelée de la zone de végétation brunie, dégradée, morte, point central de la zone d'environ 730 m d'altitude, lat. 14.80207 et long. -61.17708 (Photo OVSM-IPGP). Le cercle délimite la zone où des marqueurs au sol ont été installés le 5 mars 2021 en vue de suivre l'évolution des fractures au cours du temps (voir Figure 4 du bulletin de septembre 2021, mires photogrammétriques et sites de mesures d'extensométrie identifiés par des couples d'étoiles jaunes).

Le suivi de l'indice NDVI de vigueur de la végétation (R. Grandin, J-C Komorowski) a été effectué à partir de l'analyse des images satellitaires Sentinel\_2 (ESA, CNES, CNRS, résolution de 10 m sur la zone VEG1) et des images Planets (résolution de 3 m). Cette analyse a permis de localiser d'autres zones dégradées (VEG2, VEG3 et VEG4) à proximité de la zone VEG1. Les images de septembre (2021-09-22) et de novembre (2021-11-06) permettent de suivre l'évolution de ces zones de dépérissement de la végétation :

- 1) l'évolution de la zone VEG2 située au sud-sud-est de VEG1 qui continue de dépérir alors que la végétation continue à repousser au niveau de VEG1,
- 2) la légère progression du dépérissement sur le flanc sud du Morne Plumé à l'ouest du cadre rouge dans une zone VEG3 (corde de canyoning corrodée dans la zone de la haute rivière Claire en 2019 et 2020) au niveau du triangle violet,
- 3) un dépérissement de végétation au niveau d'une zone (VEG4) dans une mare située dans la haute rivière Claire, dans une zone (indiquée par une flèche blanche sur la **Figure 15**) qui pourrait correspondre à un ancien cratère d'explosion phréatique.



**Figure 15.** Comparaison de l'indice NDVI de vigueur de la végétation et donc son niveau de dégradation, de l'orange (non dégradée), au jaune (faiblement dégradée), au vert (fortement dégradée) déterminé par l'analyse des images satellitaires Planets sur la zone VEG1 (R. Grandin, UP-IPGP, ISDeform, J-C Komorowski, IPGP, SNOV): a) 2021-09-22; b) 2021-11-06. Les zones de dégradation principales suivis sont indiquées par les flèches blanches, les autres zones jaunes sont soit des fonds de rivières rocailloux soit des zones avec des nuages.

Une zone d'émission de bulles de gaz à partir du fond marin (**Figure 16**) a été observée au niveau de l'embouchure de la rivière des Pères, à moins de 11 m de profondeur, suite au témoignage d'un pêcheur fin juin 2021. Cette zone, d'une superficie de 1200 m<sup>2</sup> au mois d'octobre, se caractérise par la présence sur le fond marin sableux de très nombreux points d'où sont émis des trains de bulles de gaz. Ces trains de bulles de gaz remontent de manière continue, mais avec un flux variable, pour atteindre la surface. Nous avons mis en place une collaboration avec le Parc Naturel Marin de Martinique afin de mutualiser les moyens pour effectuer des mesures supplémentaires en mer. Les mesures réalisées par l'OVSM en décembre montrent une diminution de la température d'un point d'émission de bulles par rapport à celle mesurée au mois d'octobre : 29.1°C en décembre au lieu de 31°C en octobre, contre environ 28.9°C dans l'eau environnante. Le pH mesuré en collaboration avec le Parc Naturel Marin de Martinique au niveau d'un point d'émission est relativement stable par rapport au mois d'octobre avec une valeur minimale de 5.5 contre 8.2 dans l'eau environnante. Ce type de manifestation est fréquent sur des sites volcaniques sous-marins actifs ou pas, par exemple en Dominique (Soufrière et Champagne) ou en Italie (sites de Panarea, Vulcano, Baie de Pozzuoli) et en Grèce (Santorin).

L'IPGP réalise régulièrement des mesures du suivi physico-chimique et des prélèvements de ces fluides afin de contraindre l'origine de ce dégazage et d'évaluer sa relation éventuelle avec le système hydrothermal et magmatique de la Montagne Pelée. Les analyses réalisées par l'OVSM-IPGP permettront de déterminer la relation éventuelle de ce dégazage sous-marin avec l'activité de la Montagne Pelée enregistrée par l'OVSM depuis 2019.



**Figure 16.** Photographie du 15 septembre 2021 illustrant la remontée de trains de bulles en mer à partir du fond marin sur un site localisé entre Saint-Pierre et le Prêcheur à moins de 10 m de profondeur. Source : OVSM IPGP.

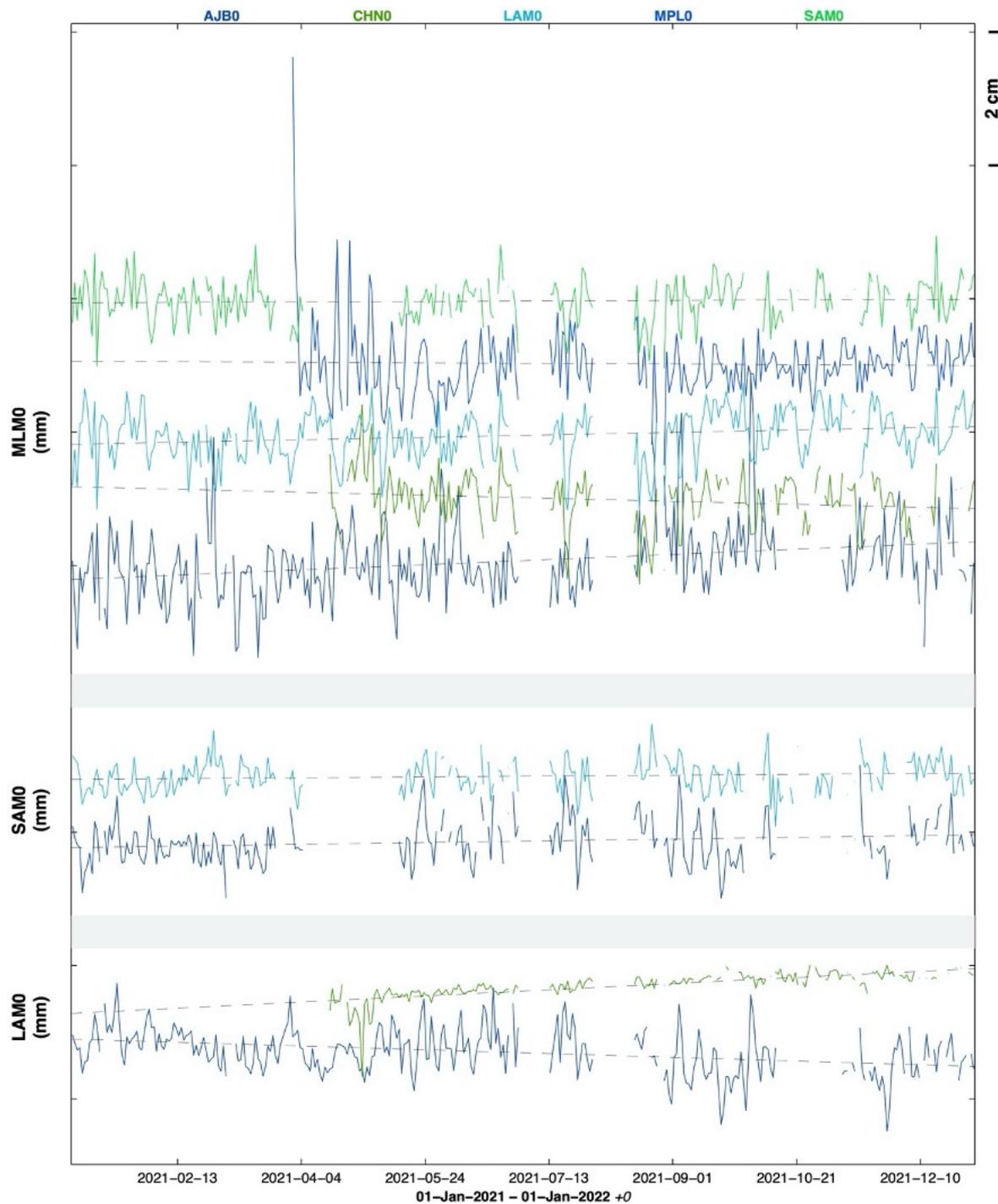
## V. 4. Déformation de la Montagne Pelée

### GNSS Permanents et de répétition

Une nouvelle campagne de mesures de répétition a été effectuée en mars-avril 2021 par J.B. de Chabalier (IPGP). La **Figure 17** montre les mesures de la déformation à l'échelle de la Montagne Pelée suite aux campagnes de répétitions de 2018 et 2019.



**GNSS Gamit Pelée – Baselines**  
Request by Fabrice R. Fontaine [FaFo] © OVSM, 2022 + © IPGP, 2022



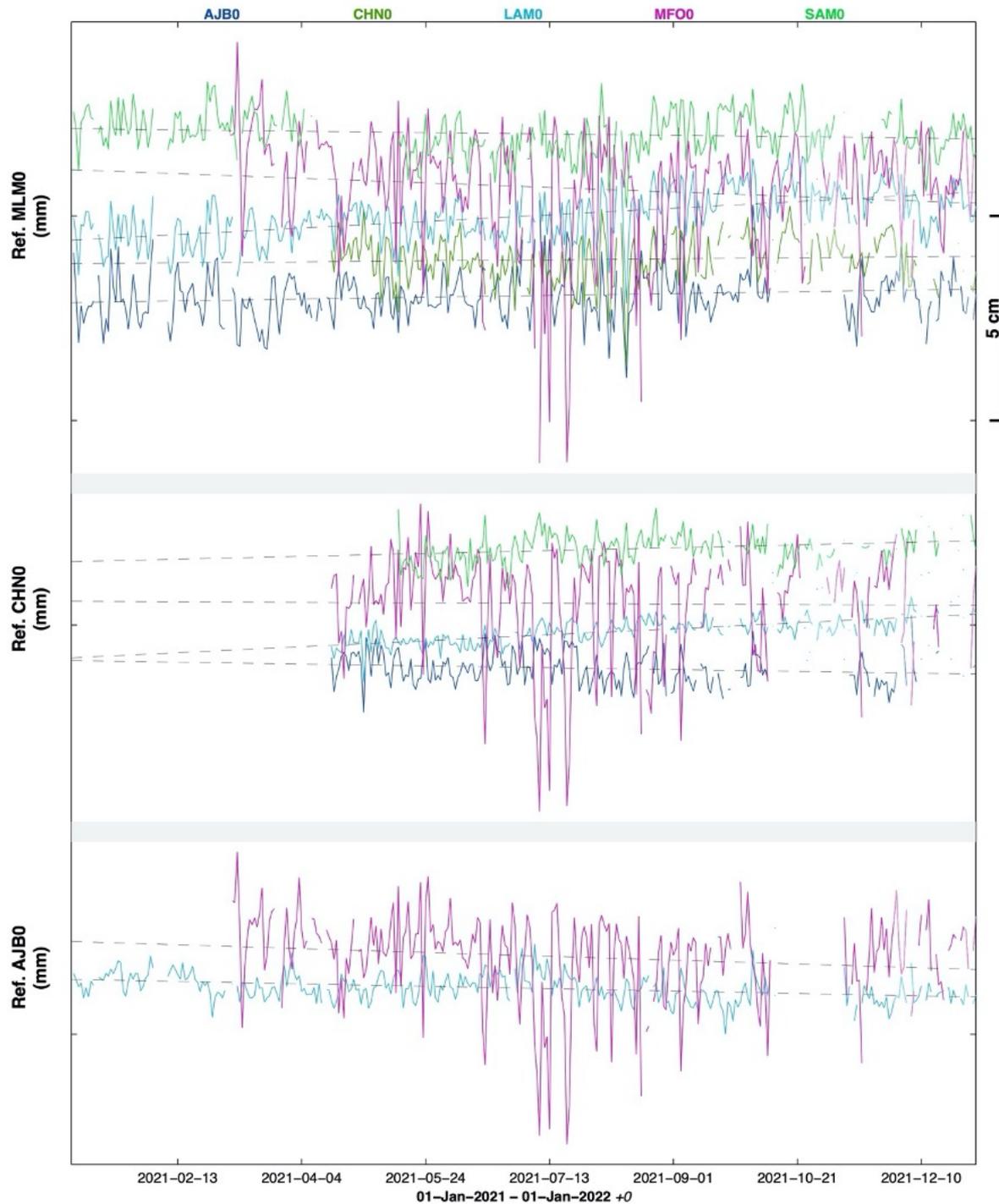
PROC.GAMIT\_PEELE / BASELINES\_ - webobs@webobsv4 - 13-Mar-2022 22:11:00 +0 - gnss.m (2021-10-14) / WebObs project (Beauducel et al., 2001-2022)

**Figure 18.** Évolution de la distance entre paires de récepteurs GNSS (Global Navigation Satellite System) du réseau de surveillance de la Montagne Pelée lors de l'année 2021. Traitement des données effectuées avec le logiciel GAMIT/GLOBK.



### GNSS GipsyX Pelée – Baselines

Request by Fabrice R. Fontaine [FaFo]© , 2022

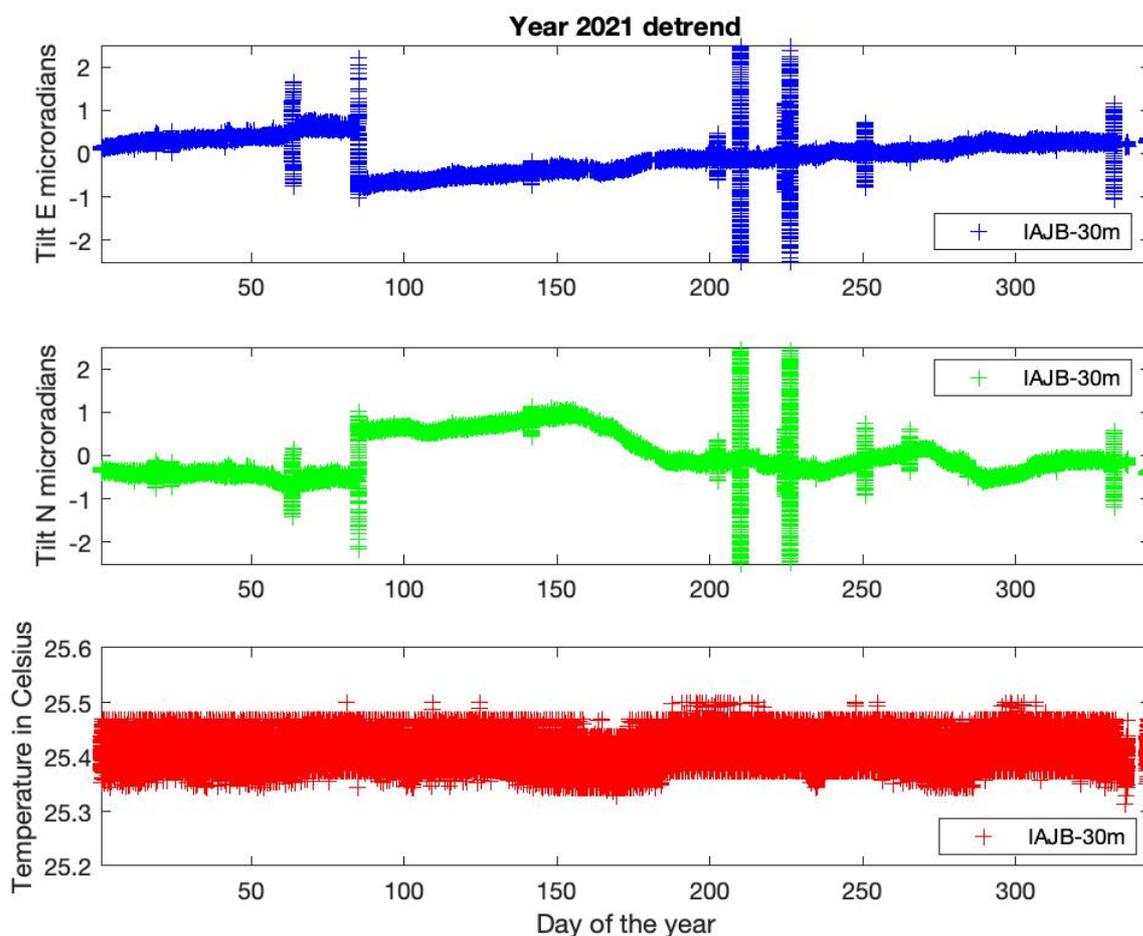


PROC.GIPSYPELEE / BASELINES\_ - webobs@webobsv4 - 13-Mar-2022 22:11:30 +0 - gnss.m (2021-10-14) / WebObs project (Beauducel et al., 2001-2022)

**Figure 19.** Évolution de la distance mesurée entre paires de récepteurs GNSS du réseau de surveillance de la Montagne Pelée lors de l'année 2021. Traitement des données réalisé avec le logiciel GipsyX.

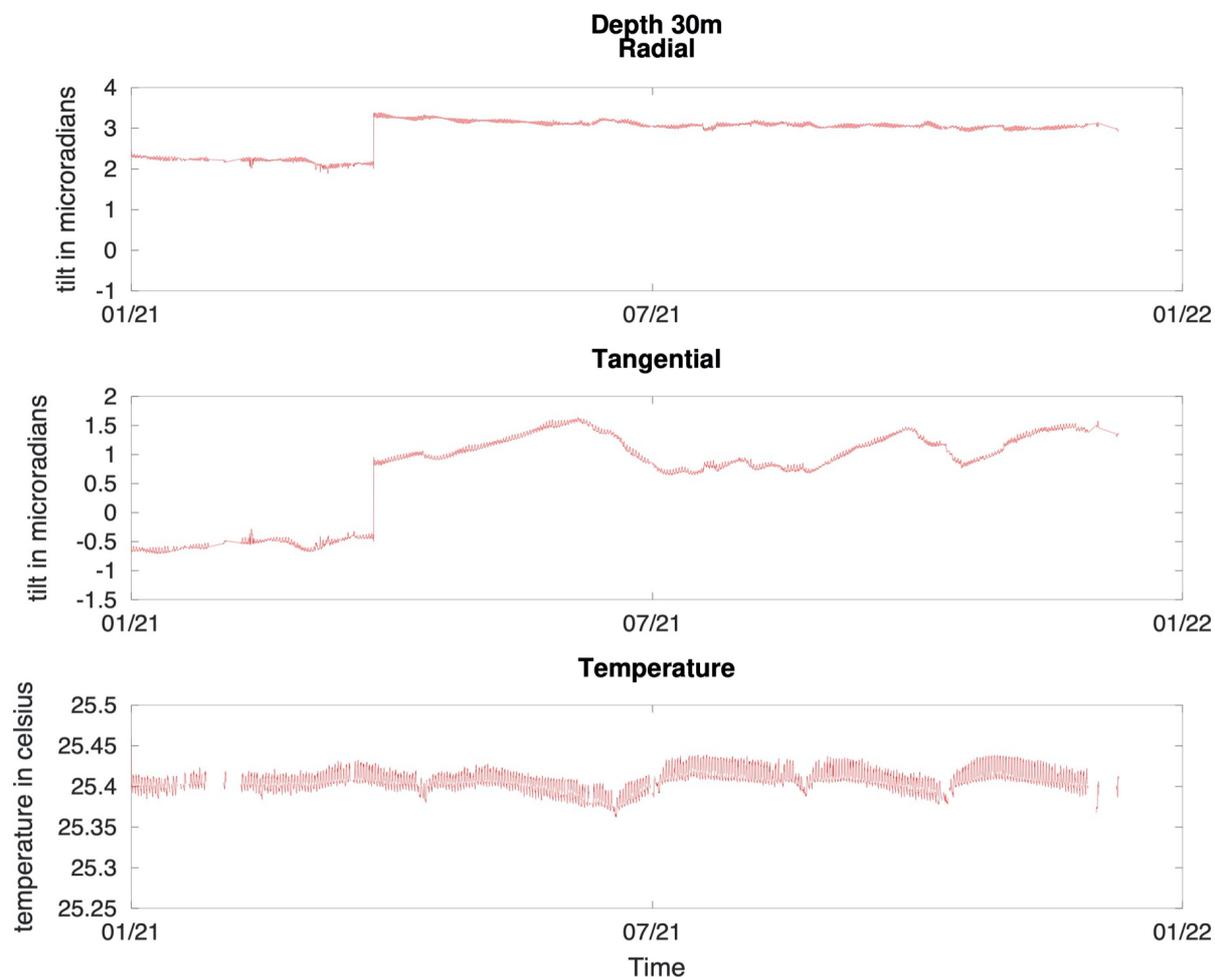
## Inclinométrie

La variation de l'inclinaison mesurée à 30 m de profondeur au niveau du forage situé à Ajoupa Bouillon est représentée à la **Figure 20**. Les mesures des inclinomètres sont affectées par les séismes de forte magnitude. Un saut de l'inclinaison est observé le 26 mars 2021 (85<sup>ème</sup> jour de l'année) journée lors de laquelle se produit à 00h51 (heure locale) un séisme de magnitude 6 ressenti en Martinique. Ce séisme a été localisé au nord-est de la Guadeloupe à une profondeur de 24 km. A la suite de ce séisme la valeur de l'inclinaison n'est pas revenue au bout de 24h à sa valeur initiale. Deux changements brusques de l'inclinaison sont aussi observés au niveau des 2 composantes (est-ouest et nord-sud) lors des journées : 210 (29 juillet) et 226 (14 août). Cependant, l'inclinaison retourne rapidement à sa valeur initiale à la suite de ces événements. Ces changements correspondent aux télé-séismes de magnitude 8.2 à 99 km au sud-est de Perryville en Alaska et au séisme d'Haïti de magnitude 7.2 précédé d'environ 31 minutes par un séisme de magnitude 6.9 à 125 km au sud-est de Perryville en Alaska. Aucune donnée n'est disponible du 10 au 31 décembre 2021. La température est aussi représentée pour comparaison car les variations d'inclinaison sont aussi sensibles aux changements de pression atmosphérique et de température (e.g., Fontaine et al., 2014). La composante est-ouest est la plus proche de la composante radiale.



**Figure 20.** Variation de l'inclinaison du 1<sup>er</sup> janvier au 10 décembre 2021 au niveau des inclinomètres de forage de IAJB à 30 m de profondeur. La température est relativement stable pendant cette période. Traitement des données (normalisation de l'amplitude et correction liée à la dérive temporelle) par F.R. Fontaine.

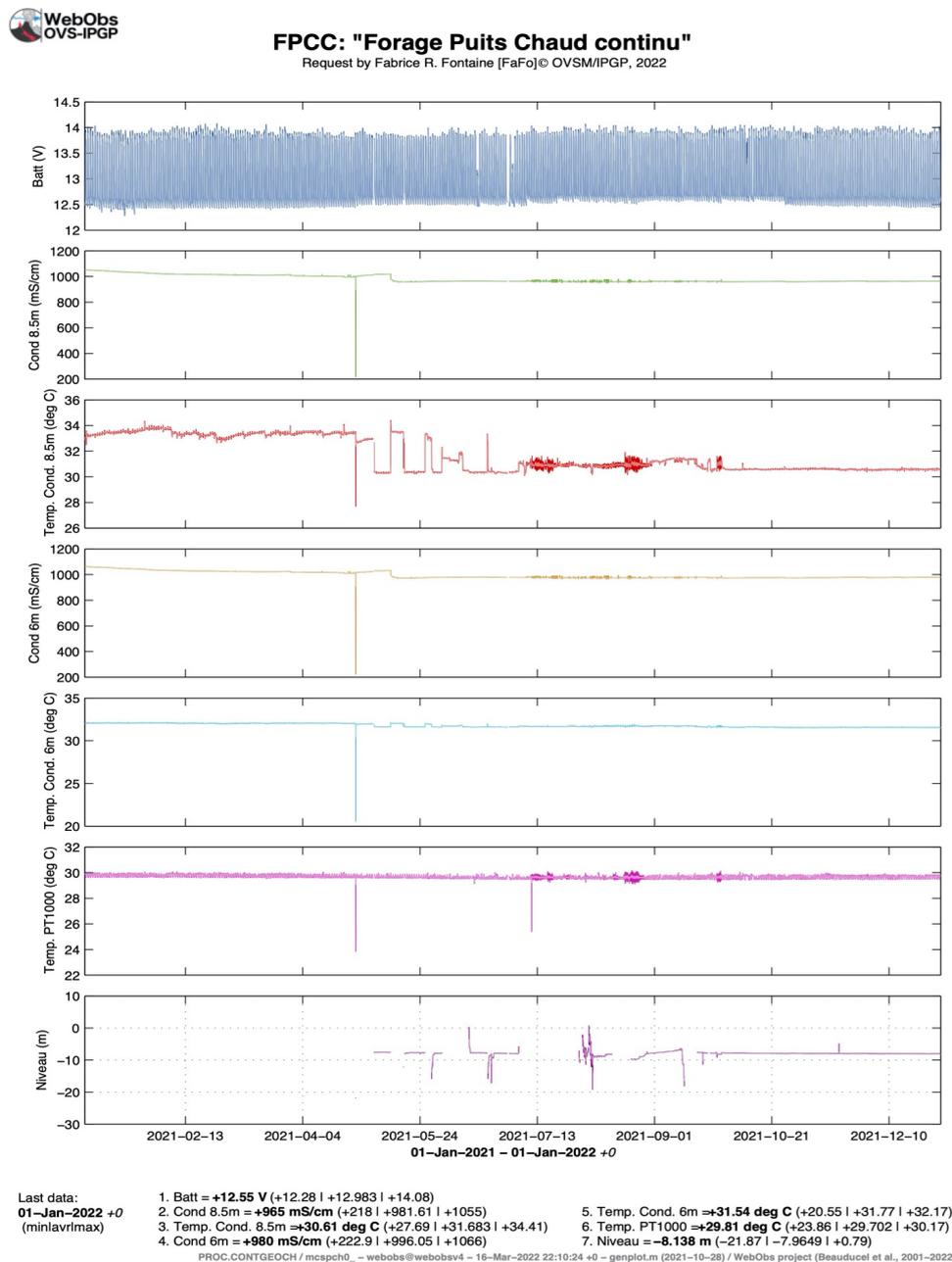
Le graphique suivant (**Figure 21**) montre l'évolution des mesures d'inclinaison en 2021 selon les composantes radiales et transverses. Les données des inclinomètres ne montrent pas en 2021 de déformation claire de l'édifice de la Montagne Pelée associée à une intrusion ou au déplacement de magma en profondeur.



**Figure 21.** Variation de l'inclinaison mesurée en 2021 au niveau des inclinomètres de forage de IAJB à 30 m de profondeur comparée aux variations de la température. Traitement des données (sous-échantillonnage, normalisation de l'amplitude et corrections liées à la dérive temporelle et aux sauts générés par les séismes) par J.-M. Saurel.

## V. 5. Suivi géochimique des sources thermales de la Montagne Pelée et de la rivière du Prêcheur

La **Figure 22** illustre les mesures réalisées en continu lors de l'année 2021 au niveau du forage de Puits Chaud. La tension batterie reflète les variations d'insolation 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 2021. La conductivité diminue légèrement au cours de l'année, passant de 1054 à 965 micro-siemens/cm à 8.5 m de profondeur. Les variations observées traduisent une variation du rapport eau douce/eau de mer. La température des eaux (sonde PT1000) montre de faibles variations au cours de l'année avec des valeurs proches de 30°C. Des prélèvements manuels ont lieu par ailleurs chaque mois dans le forage de Puits Chaud et des mesures de température, *pH* et conductivité sont effectuées in situ. Les valeurs mesurées lors des prélèvements manuels sont cohérentes avec les observations continues.



**Figure 22.** Mesures physico-chimiques réalisées en continu à Puits Chaud en 2021.

## RAPPORT ANNUEL OVSM - IPGP – 2021

Les mesures réalisées manuellement et mensuellement au niveau des sources thermales de la Montagne Pelée sont présentées dans les tableaux suivants (**Tableaux 3 à 7**).

### Rivière du Prêcheur (prélèvements mensuels)

Date de prélèvements	26 janv.	Fév.	29 mars	21 avril	11 mai	21 juin	22 juillet	25 août	29 sept.	26 oct.	30 nov	15 déc.
T°C	25.2	N.R.	25.7	27.3	27.3	26.7	28.5	25.5	28	26.8	25.5	24.8
Conductivité $\mu\text{S}/\text{cm}$	155.8	N.R.	133.9	157.2	161.8	138.8	152.6	145.8	144.2	152.5	146.3	140.5
pH	7.89	N.R.	7.942	8.152	8.34	7.85	8.012	7.76	7.708	7.94	8.19	7.99
HCO <sub>3</sub> -mg/L	71.61	N.R.	59.85	72.91	77.2	65	70.5	68.24	72.62	82.54	77.97	72.82

**Tableau 3.** Mesures physico-chimiques réalisées à la rivière du Prêcheur en 2021. \*N.R. (Non réalisé)

### Forage de Puits Chaud (prélèvements mensuels)

Date de prélèvements	26 janv.	Fév.	29 mars	21 avril	11 mai	21 juin	22 juillet	25 août	29 sept.	26 oct.	30 nov.	15 déc.
T°C	31.4	N.R.	30.9	31.8	32.1	31.9	31.8	31.5	31.7	31.6	31.4	31.4
Conductivité $\mu\text{S}/\text{cm}$	1316	N.R.	1270	1400	1396	1180	1298	1171	1198	1205	1208	1300
pH	6.535	N.R.	6.485	6.442	6.64	6.615	6.52	6.849	6.485	6.49	6.51	6.61
HCO <sub>3</sub> -mg/L	390.96	N.R.	401.4	397.28	395.55	407.93	430.62	428.5	449.11	425.86	421.66	403.17

**Tableau 4.** Mesures physico-chimiques réalisées au forage de Puits Chaud en 2021. \*N.R. (Non réalisé)

## RAPPORT ANNUEL OVSM - IPGP – 2021

Depuis mai 2021, deux autres sites sont mesurés et échantillonnés. Il s'agit de FCR1 Forage Carrière N°1 (accès Morne Lénard, profondeur ~ 50m) et FCR2 Forage Carrière N°2 (carrière Fond Canonville, profondeur ~ 60m)

### Forage de la Carrière n°1 (prélèvements mensuels)

Date de prélèvements	21-Jan	Fév 21	Mars 21	Avril 21	12/5/21	21/06/21	22/07/21	25/08/21	29/09/21	26/10/21	30/11/21	15/12/21
T°C	N.R.	N.R.	N.R.	N.R.	27.7	28	27.5	27.5	27.4	27.5	27.2	27.3
Conductivité $\mu\text{S}/\text{cm}$	N.R.	N.R.	N.R.	N.R.	256	310	264	248	269	264	253	272
pH	N.R.	N.R.	N.R.	N.R.	7.93	7.96	6.88	6.941	6.77	6.88	6.85	6.93
HCO <sub>3</sub> -mg/L	N.R.	N.R.	N.R.	N.R.	104.84	111.51	112.46	114.37	121.29	115.14	123.9	118.95

Tableau 5. Mesures physico-chimiques réalisées à FCR1 en 2021. \*N.R. (Non réalisé)

### Forage de la Carrière n°2 (prélèvements mensuels)

Date de prélèvements	21-Jan	Fév 21	Mars 21	Avril 21	17/05/21	Juin	22/07/21	25/08/21	29/09/21	21-Oct	30/11/21	Déc 21
T°C	N.R.	N.R.	N.R.	N.R.	27.2	N.R.	27.6	27.3	N.R.	N.R.	27.1	N.R.
Conductivité $\mu\text{S}/\text{cm}$	N.R.	N.R.	N.R.	N.R.	376	N.R.	418	374	N.R.	N.R.	372	N.R.
pH	N.R.	N.R.	N.R.	N.R.	6.89	N.R.	6.78	6.72	N.R.	N.R.	6.85	N.R.
HCO <sub>3</sub> -mg/L	N.R.	N.R.	N.R.	N.R.	140.68	N.R.	145.82	146.4	N.R.	N.R.	148.31	N.R.

Tableau 6. Mesures physico-chimiques réalisées à FCR2 en 2021. \*N.R. (Non réalisé)

Sources Chaudes (prélèvements 1 à 4 fois/an)

Date de prélèvements	18/05/21 Point n°1	18/05/21 Point n°2	18/05/21 Point n°3	18/05/21 Point n°4 (SC4)
T°C	26.5	26.6	N.R	31.1
Conductivité μS/cm	587	619	N.R	1301
pH	6.88	6.66	N.R	6.18
HCO3- mg/L	374.01	396.5	N.R	796.81

Date de prélèvements	08/09/21 Point n°1	08/09/21 Point n°2	08/09/21 Point n°3	08/09/21 Point n°4 (SC4)	08/09/21 Point à proximité de SC4
T°C	26.2	N.R	24.9	32.2	36.5
Conductivité μS/cm	550	N.R	582	1135	1390
pH	6.611	N.R	6.65	5.93	6.035
HCO3- mg/L	369.4	N.R	365	880.68	N.R

Date de prélèvements	04/11/21 Point n°1	04/11/21 Point n°2	04/11/21 Point n°3	04/11/21 Point n°4 (SC4)
T°C	26	26.5	25.3	34.4 (Sonde Tinytag en continue)
Conductivité μS/cm	558	675	587	1164
pH	6.55	5.79	7.06	6.02
HCO3- mg/L	357.04	429.29	393.07	841.42

Tableau 7. Mesures physico-chimiques réalisées aux Sources Chaudes en 2021 (le 18 mai, le 8 septembre et le 4 novembre). \*N.R. (Non réalisé)

Au cours de l'année 2021, aucune activité fumerollienne n'a été observée sur les flancs et au sommet de la Montagne Pelée.

Ces mesures confirment la lente diminution de la température des eaux thermales souterraines de la coulée de la rivière Blanche depuis le milieu des années 1960 jusqu'à ce jour. Cependant, il n'y a pas de données depuis 2008 sur les sources thermales de la haute rivière Claire qui ne sont pas accessibles de manière sécurisée à l'échantillonnage, et qui permettraient de compléter la compréhension du système hydrothermal et de sa dynamique.

Le 8 septembre 2021, dans le cadre du suivi de la source N°4 (SC4), l'OVSM-IPGP a procédé à l'installation d'une sonde de température de type Tinytag permettant le suivi en continu de la température de cette source (**Figure 23**).



**Figure 23.** Installation dans la rivière Chaude d'une sonde de mesures de la température en continu de type Tinytag à la source hydrothermale n°4 (SC4).

Au mois de mai 2021 une mission de mesure a également été effectuée en collaboration avec l'OVSG IPGP (Guadeloupe) et l'OVVF IPGP (La Réunion).

Sept sources ont été mesurées et échantillonnées entre le 11 et 18 Mai 2021 (Puits Chauds, la rivière du Prêcheur, FCR 1 (50m), FCR 2 (60m) et les sources chaudes n°1, 2 et 4).

### **Bilan des mesures géochimiques du dégazage de la Montagne Pelée**

Un état des lieux des émanations de gaz (ou leur absence) sur et autour de la Montagne Pelée a été effectué au mois de mai 2021, via différentes techniques de mesures in situ et de divers sites pour l'analyse en laboratoire, et en collaboration avec l'OVSG IPGP (Guadeloupe) et l'OVPF IPGP (La Réunion). Les sources Picodo et Mitan n'ont pas été accessibles à cause des nombreux éboulements. Des analyses en anions, cations, en isotopie (Sr, C, H<sub>2</sub>O, Cl), traces et gaz dissous ont été réalisées sur tous ces échantillons prélevés.

**Capteur MultiGAS** : Le 11 mai 2021 sur la zone de VEG1, les concentrations en CO<sub>2</sub> sont <490 ppm, H<sub>2</sub>S < 0.2 ppm, SO<sub>2</sub> < 0.09 ppm. Il n'y a pas d'anomalie en SO<sub>2</sub> et H<sub>2</sub>S. En revanche, même si nous avons de faibles concentrations, on remarque des faibles variations en CO<sub>2</sub> (pic de maximum 80 ppm par rapport à la valeur standard de l'atmosphère de 410 ppm) et plus faiblement en H<sub>2</sub>O.

**Capteur Dräger** : Les données sont cohérentes avec les données MultiGas : des valeurs en CO<sub>2</sub> parfois légèrement au-dessus de la valeur standard atmosphérique avec quelques variations. Les mesures du capteur **Dräger** montrent une concentration moyenne de 407 ppm en CO<sub>2</sub> sur VEG1 le 11 mai 2021 (zone de végétation brunie, dégradée, morte, Figures 3 et 4) et 449 ppm en CO<sub>2</sub> sur Morne Plumé le 12 mai 2021.

**Mesures des émissions de CO<sub>2</sub> par le sol par chambre d'accumulation** : Les flux au sol sur la zone de VEG1 le 11 mai 2021 sont très faibles et varient de 1.8 à 13.61 g/m<sup>2</sup>/d (5 g/m<sup>2</sup>/d en moyenne). A titre de comparaison, le flux est en moyenne 560 g/m<sup>2</sup>/d à La Soufrière de Guadeloupe sur le dôme dans les zones affectées par une forte anomalie thermique (autour de 90-95 °C) et des émanations diffuses d'H<sub>2</sub>S en plus du CO<sub>2</sub>.

La bonne corrélation entre les valeurs de concentration en CO<sub>2</sub> mesurées avec le capteur Dräger et le capteur MultiGas sur le même site (VEG1) et le même jour (11 mai 2021) montre que les données élevées de concentration en CO<sub>2</sub>, mesurées avec le capteur Dräger sur ce même site (VEG1) mais lors des visites précédentes même le 8 février et le 5 mars 2021 (Fig. 4), sont des mesures cohérentes et représentatives d'un processus de dégazage passif et diffus du sol dans cette zone de VEG1 ainsi que dans certaines zones proches du Morne Plumé.

### **Analyse de gaz dissous de la Montagne Pelée**

4 prélèvements ont été effectués en 2021 au niveau de sources et d'une rivière de la Montagne Pelée : en mai, septembre, octobre et novembre 2021. Un premier prélèvement a été réalisé en mai au niveau de Puits Chaud, de la rivière du Prêcheur, des sources chaudes de la rivière Chaude et du forage de la carrière n°2. Les analyses ont été effectuées en collaboration avec Thierry Labasque (Géosciences Rennes, OSUR, Univ de Rennes 1) et l'OVSG IPGP.

Un enrichissement important de la source n°4 des sources chaudes en CO<sub>2</sub> et <sup>4</sup>He est observé suite au prélèvement de mai 2021. Dans une moindre mesure, un enrichissement est aussi noté à la source n°2 en mai 2021.

Les eaux sont équilibrées pour les autres points de prélèvement, mais un enrichissement en <sup>4</sup>He est constaté pour la rivière du Prêcheur. Une légère augmentation est constatée en <sup>4</sup>He et CO<sub>2</sub> lors de l'année 2021, avec un dégazage des autres gaz (Ar, N<sub>2</sub>) associés.

Les résultats de ces analyses seront comparés à ceux des analyses isotopiques en cours en collaboration avec P. Agrinier (IPGP).

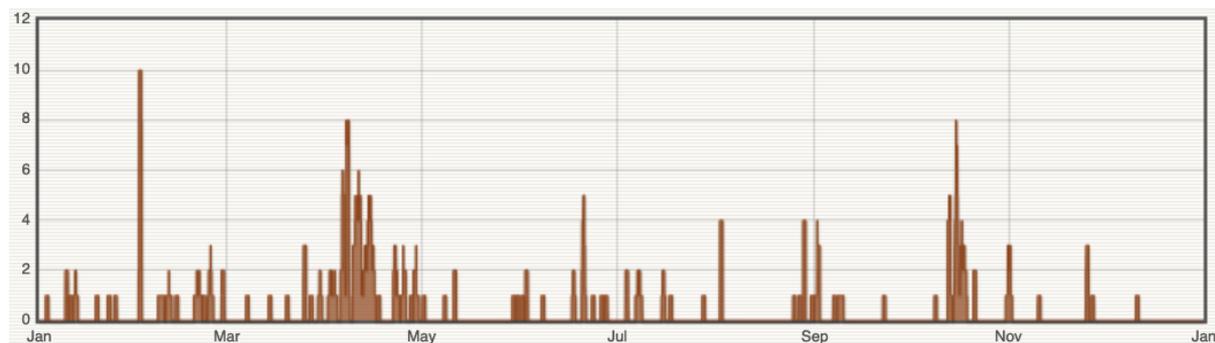
## V. 6. Glissements de terrain et lahars

### Glissements de terrain

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

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

Nous répertorions les glissements à partir des signaux sismiques du réseau de la Montagne Pelée. En 2021, nous avons ainsi observé au moins **177 éboulements (Figure 24)** :



**Figure 24.** Distribution du nombre journalier d'éboulements dans le catalogue de l'OVSM IPGP pour l'année 2021.

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

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

Pour le suivi spécifique des glissements de la falaise Samperre, nous avons installé en décembre 2010 au Morne Vert Pré un mât prévu pour recevoir un appareil photo. Depuis, des photos sont régulièrement prises depuis ce site, afin de suivre visuellement les glissements de la falaise Samperre.

### Lahars

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

En 2021, l'OVSM-IPGP n'a pas identifié de **lahars** ni **d'écoulements concentrés** sur les enregistrements des stations sismologiques et des géophones de ses réseaux.

## V. 7. 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 : <http://www.ipgp.fr/fr/ovsg/bulletins-mensuels-de-lovsg>

**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/](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>

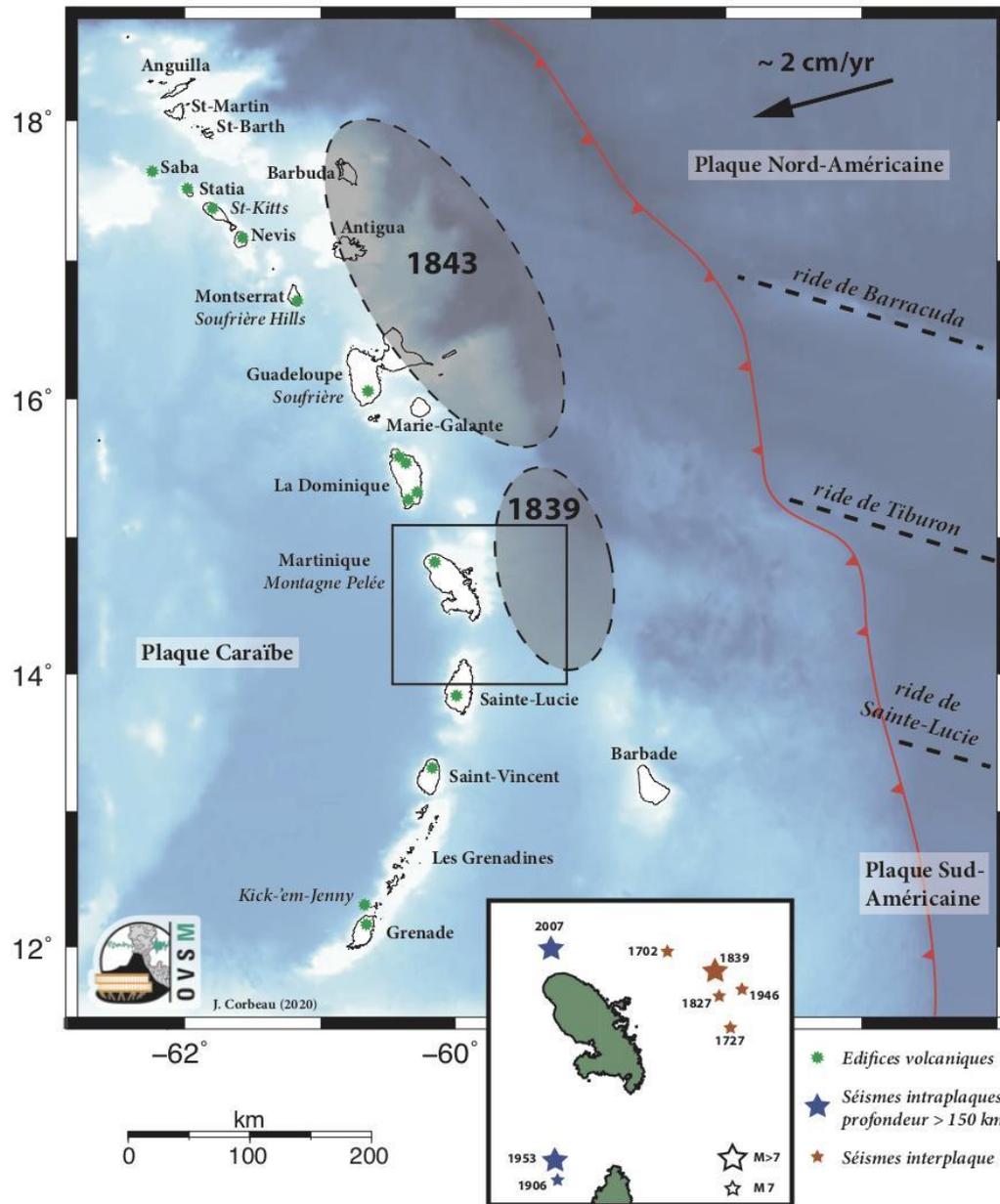
## VI Activité locale et régionale

### VI. 1. Contexte tectonique

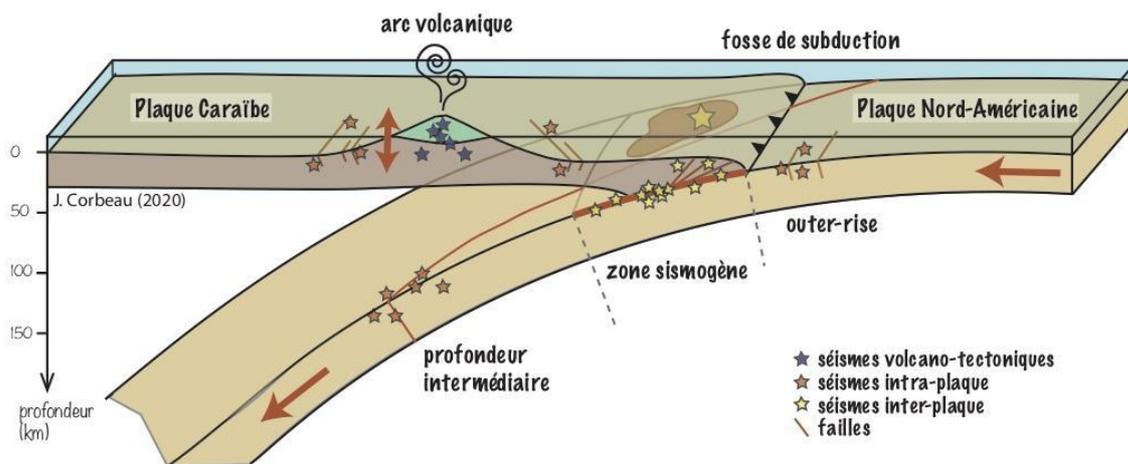
L'arc insulaire des Petites Antilles résulte du plongement des plaques tectoniques Nord et Sud-Américaines sous la plaque Caraïbe. Ce phénomène, appelé subduction, a lieu à une vitesse d'environ 2 cm/an et est à l'origine de la majorité des séismes tectoniques de l'arc, faisant des Petites Antilles une région à fort aléa sismique (**Figure 25**). 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<sup>ème</sup> siècle (**Figure 25**) :

- ❖ 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 26**). 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 25.** 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 ressentis en Martinique.

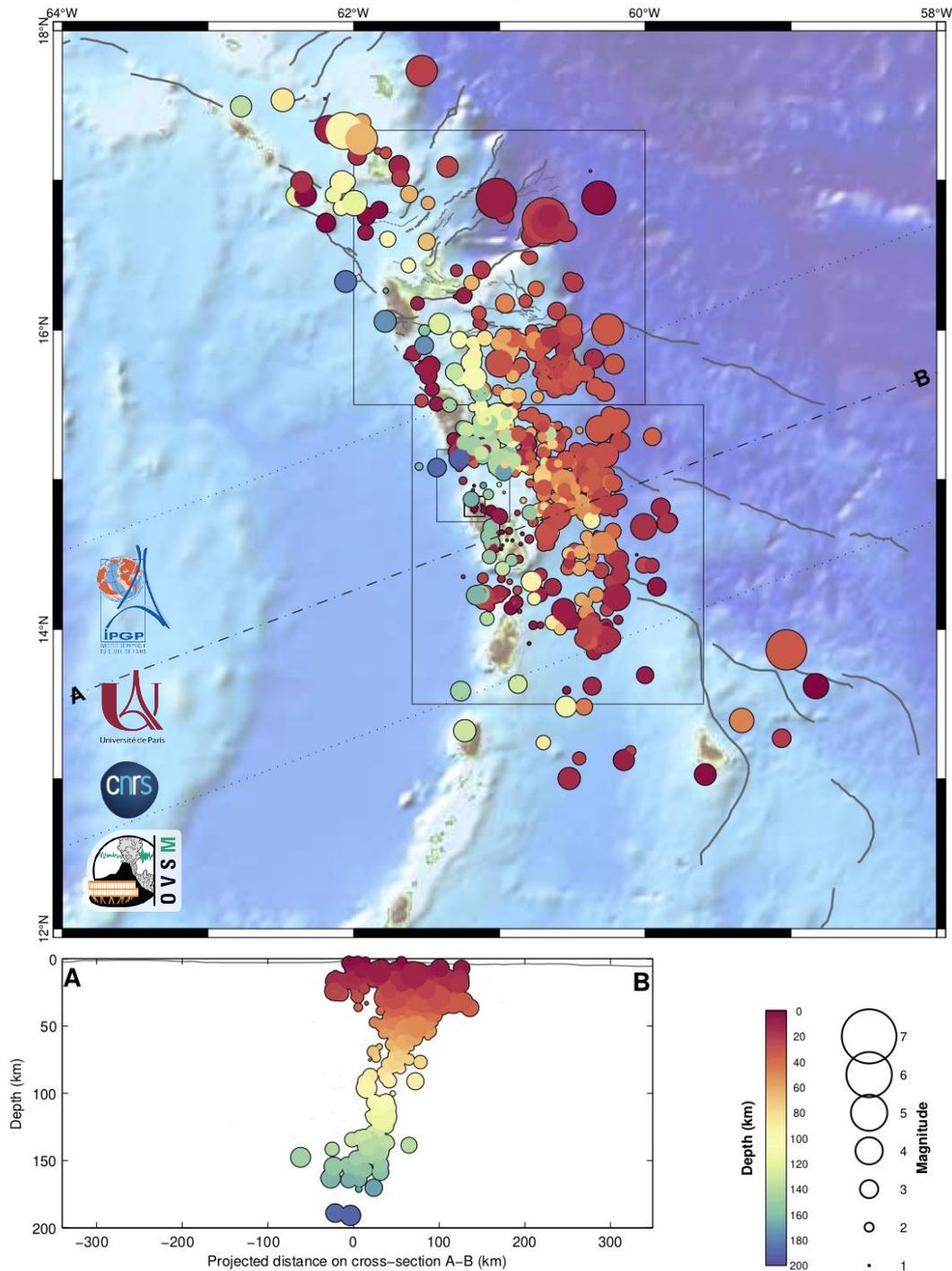


**Figure 26.** Schéma conceptuel de la zone de subduction des Petites Antilles vue en fonction de la profondeur. Les étoiles de couleur indiquent les différents types de séismes enregistrés en Martinique.

## VI. 2. Activité sismique 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 2021, l'OVSM-IPGP a identifié **880 séismes d'origine tectonique** régionaux au niveau de l'arc des Petites Antilles et **221 télé-séismes** (séismes lointains dont les hypocentres sont situés à plus de 3000 km des réseaux sismologiques et dont la magnitude est supérieure à 5). Les hypocentres de **657 séismes** d'origine tectonique ont pu être déterminés par les analystes de l'OVSM (**Figure 27**). Les localisations des séismes qui se situent à proximité des îles sont relativement bien contraintes par le réseau local ou régional (positions à +/- quelques kilomètres). Pour les séismes plus lointains, la géométrie du réseau lié à l'alignement Nord-Sud des îles peut engendrer des incertitudes plus grandes de l'ordre de la dizaine de kilomètres.

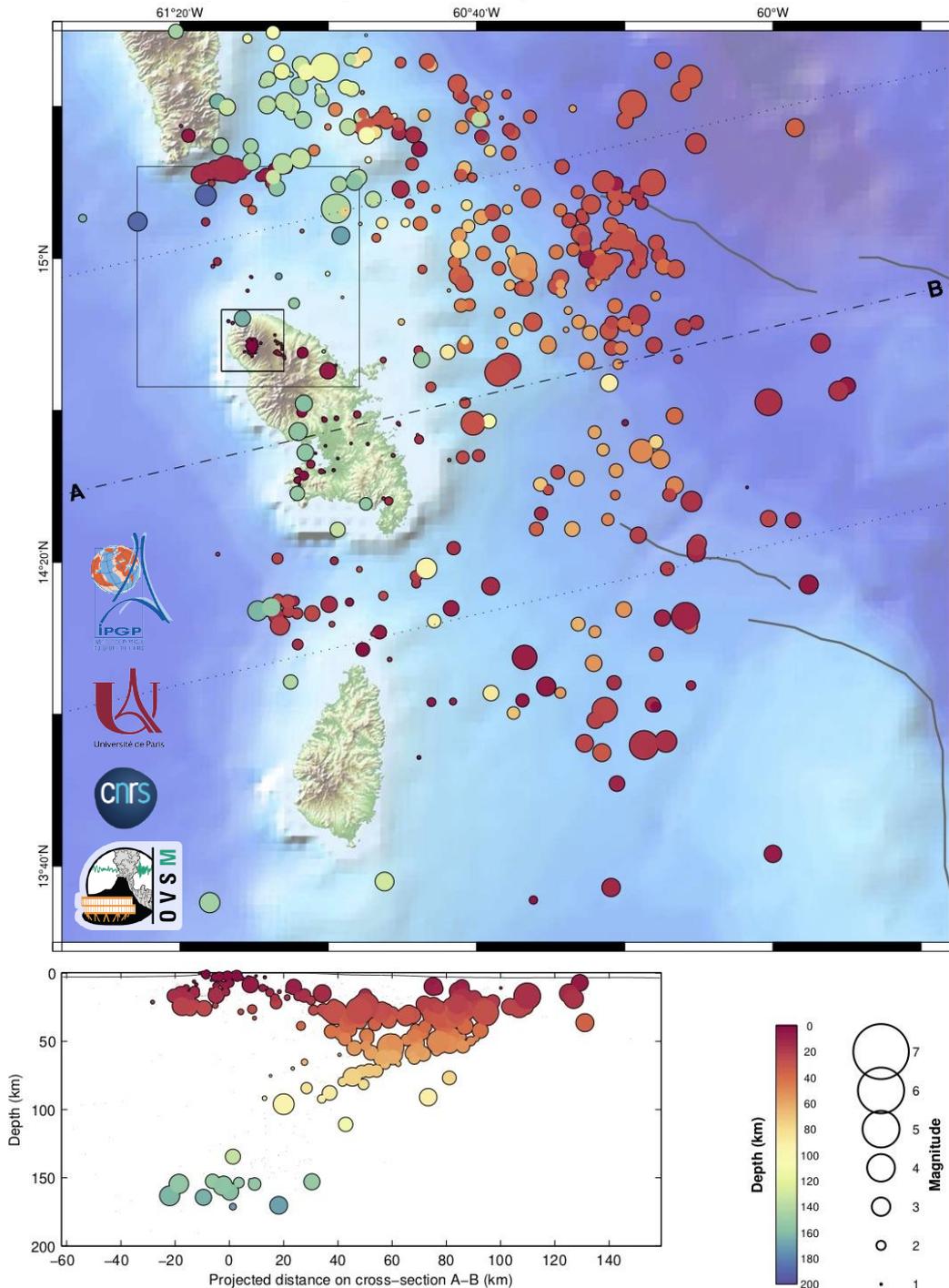


**Figure 27.** Partie supérieure : carte des épicentres des séismes enregistrés et localisés par l’OVSM-IPGP au cours de l’année 2021 sur l’arc Antillais. Partie inférieure : représentation des hypocentres des séismes en fonction de la profondeur, suivant le profil A-B indiqué sur la carte.

En 2021, la sismicité régionale enregistrée autour de la Martinique est principalement liée à (**Figure 28**) :

- ❖ 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 28**) 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 28**). 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 25**).
- ❖ 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 28**).



**Figure 28.** Partie supérieure : carte des épicentres des séismes enregistrés et localisés par l'OVSM-IPGP au cours de l'année 2021 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.

### VI. 3. Sismicité ressentie

Au cours de l'année 2021, l'observatoire a enregistré et localisé une moyenne de **55 séismes** tectoniques régionaux par mois, dont certains ont pu être ressentis par la population en fonction de leur localisation.

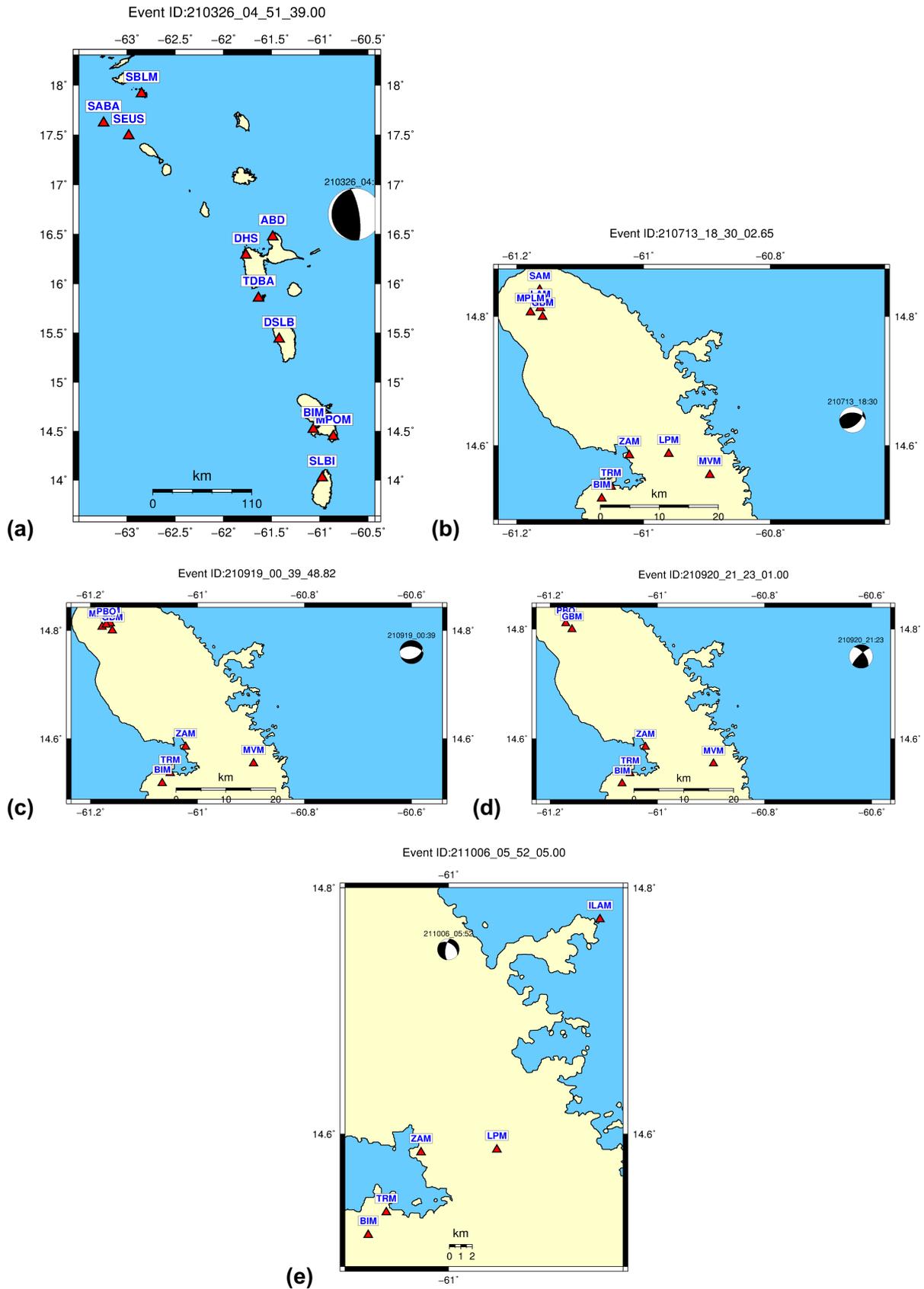
Lors d'un séisme fort, un SMS d'alerte est envoyé automatiquement vers le téléphone portable de la personne d'astreinte volontaire. Si ce message d'alerte est associé à au moins deux témoignages indépendants de personnes ayant ressenti la secousse, la personne d'astreinte prévient le SIDPC et procède immédiatement au traitement des données afin de localiser le séisme et de calculer sa magnitude. Elle émet ensuite un bulletin d'information (appelé B<sup>3</sup>) qui contient les caractéristiques du séisme et une carte indiquant les intensités prédites pour chaque commune de Martinique. Ce bulletin est à destination des autorités, des scientifiques des autres centres de surveillance régionaux, des médias, des abonnés à nos listes de diffusion, et du BCSF, qui crée alors une page sur son site web [www.franceseisme.fr](http://www.franceseisme.fr) afin de déclencher la collecte de témoignages.

En 2021, il y a eu **5 séismes ressentis** en Martinique, de faiblement ressenti à largement ressenti (intensité III à III-IV) :

- ❖ Le **26 mars 2021** à 04h51 TU au large de la Guadeloupe, magnitude **M<sub>IV</sub> 6**, profondeur 24 km, 212 km au NNE de Macouba (intensité maximale III-IV) ;
- ❖ Le **13 juillet 2021** à 18h30 TU, magnitude **M<sub>IV</sub> 3.5**, profondeur 29 km, 19 km à l'ENE du Vauclin (intensité maximale III) ;
- ❖ Le **19 septembre 2021** à 00h39 TU, magnitude **M<sub>IV</sub> 3.9**, profondeur 24 km, 35 km au NE du Vauclin (intensité maximale III-IV) ;
- ❖ Le **20 septembre 2021** à 21h23 TU, magnitude **M<sub>IV</sub> 3.9**, profondeur 28 km, 33 km au NE du Vauclin (intensité maximale III-IV) ;
- ❖ Le **6 octobre 2021** à 05h52 TU, magnitude **M<sub>IV</sub> 2.7**, profondeur 9 km, 3 km au SSW de Sainte-Marie (intensité maximale III-IV).

Ces séismes sont situés dans la zone *inter-plaque* de la subduction (zones des séismes historiques de 1839 et 1843) ainsi que dans la plaque supérieure pour le séisme du 6 octobre 2021. Pour comparaison, en 2020, 6 séismes tectoniques ont été ressentis en Martinique. Le plus fort, de M<sub>IV</sub> 5, a eu lieu le 8 janvier 2020 à 10h01 heure locale à environ 27 km au sud-est de la Dominique, à environ 144 km de profondeur (zone de profondeur intermédiaire).

Pour les 5 séismes ressentis en 2021, des mécanismes au foyer ont été calculés (**Figure 29**) afin d'identifier le type de leur rupture (rupture normale, inverse ou en décrochement) et de les replacer dans le contexte tectonique local et régional.



**Figure 29.** Mécanismes au foyer pour les 5 séismes ressentis au cours de l'année 2021. (a) séisme du 26 mars 2021, rupture inverse (b) séisme du 13 juillet 2021, rupture inverse ; (c) séisme du 19 septembre 2021, rupture normale ; (d) séisme du 20 septembre 2021, rupture inverse avec une composante décrochante ; (e) séisme du 6 octobre 2021, rupture normale avec une légère composante décrochante. Calculs de J. Corbeau.

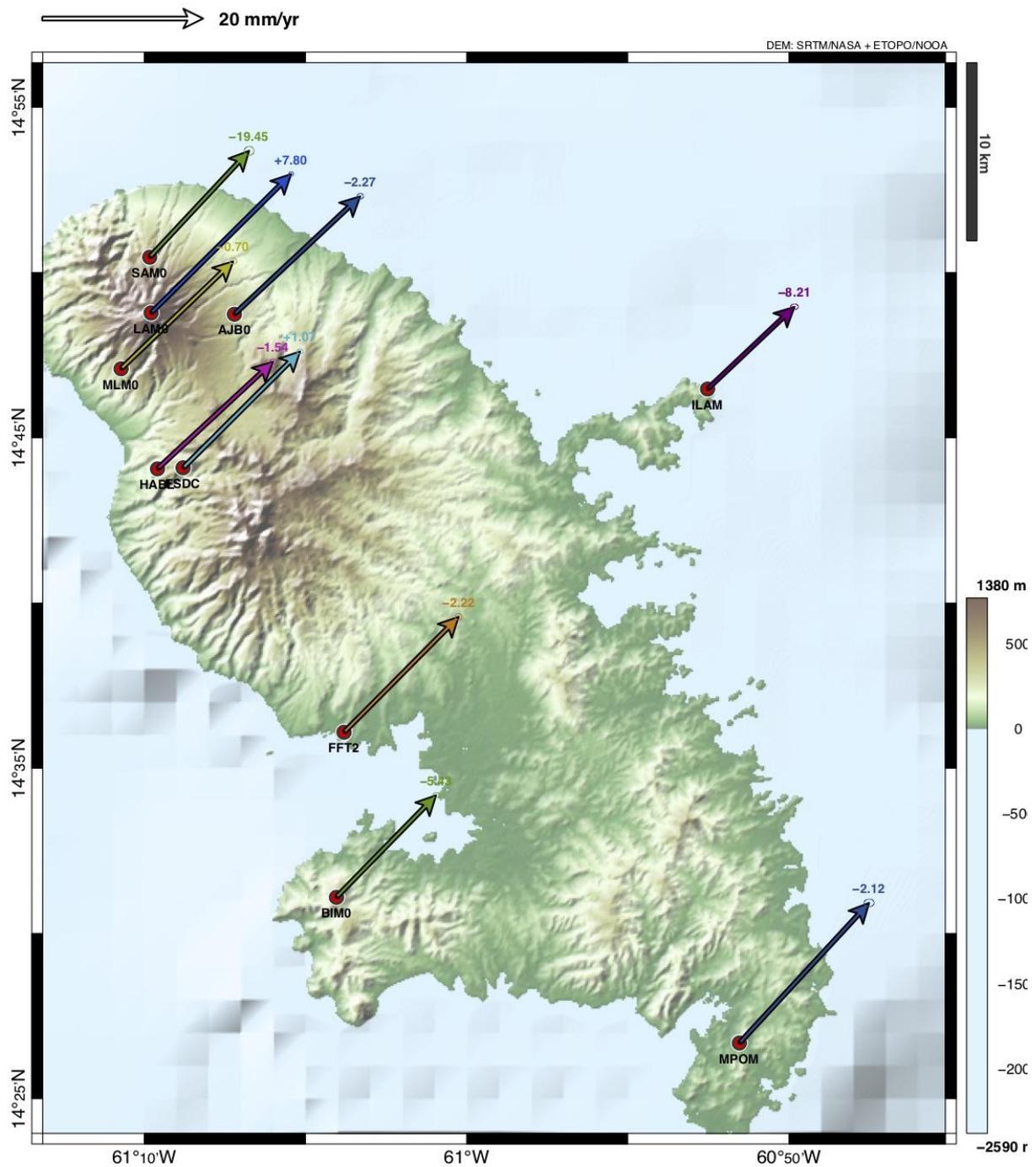
Le **Tableau 8** indique le nombre de séismes ressentis en Martinique chaque année dans la zone *inter-plaque* de la subduction, dans la zone de profondeur intermédiaire de la zone de subduction, et dans la partie superficielle de la croûte Caraïbe (zone *intra-crustale*) depuis l’an 2000. En moyenne, **9.3** séismes sont ressentis chaque année.

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

**Tableau 8.** Évolution du nombre de séismes ressentis en Martinique par année dans les différentes zones de rupture de la subduction des Petites Antilles depuis l’an 2000. La moyenne est de **9.3** séismes ressentis par an.

## VI. 4. 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 30**. 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 30.** Vecteurs de déplacement calculés à partir des deux dernières années (2020 et 2021) 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.

## VII 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 (**Sections VII.1 et VII.2**), des accéléromètres qui enregistrent l'accélération du sol (**Section VII.3**), des inclinomètres et des GPS permanents ou de répétition qui détectent la déformation du sol (**Section VII.4**). D'autres capteurs permettent aussi le suivi de paramètres géochimiques via des prélèvements réguliers sur différents exutoires de sources thermales (**Section VII.6**) ou encore de phénomènes liés à l'édifice volcanique (**Section VII.5**).

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

Les sections suivantes détaillent les différents réseaux ainsi que les différentes interventions effectuées au cours de l'année écoulée.

En 2021, tous réseaux confondus, le nombre de stations actives permanentes gérées par l'OVSM-IPGP s'élève à près de 60 stations (mono ou multi paramètres). Elles sont réparties sur l'ensemble de la Martinique avec une densité plus importante autour de la Montagne Pelée. Le **Tableau 9** récapitule l'évolution des réseaux au cours des deux dernières années.

Ce nombre est accru lors des campagnes de mesures ponctuelles (GPS de répétition, campagnes de mesures, etc) ou lors d'installation de stations temporaires pour la surveillance d'un phénomène particulier.

Réseau	Stations en 2020	Stations en 2021	En résumé
<b>Sismologique et Accélérométrique</b>	4 VSAT Multiparamètres 1 Très Large-Bande 4 Large-Bande Montagne Pelée 5 Courte-Période Montagne Pelée	4 VSAT Multiparamètres 1 Très Large-Bande 8 Large-Bande Montagne Pelée 1 Courte-Période Montagne Pelée 3 Large-Bande Temporaires Montagne Pelée	Extension du réseau permanent large-bande et ajout d'un réseau temporaire ; Réseau accélérométrique inchangé
<b>Déformation</b>	10 Permanentes dont 4 Montagne Pelée 20 Répétitions	13 Permanentes dont 7 Montagne Pelée 20 Répétitions	Extension du réseau permanent Montagne Pelée
<b>Géochimique</b>	3 Points de mesures 1 Station continue	5 Points de mesures 1 Station continue	Extension du nombre de points de mesures

**Tableau 9.** Récapitulatif de l'évolution des réseaux de surveillance de Martinique maintenus par l'OVSM IPGP entre 2020 et 2021.

## VII. 1. Le réseau sismologique régional

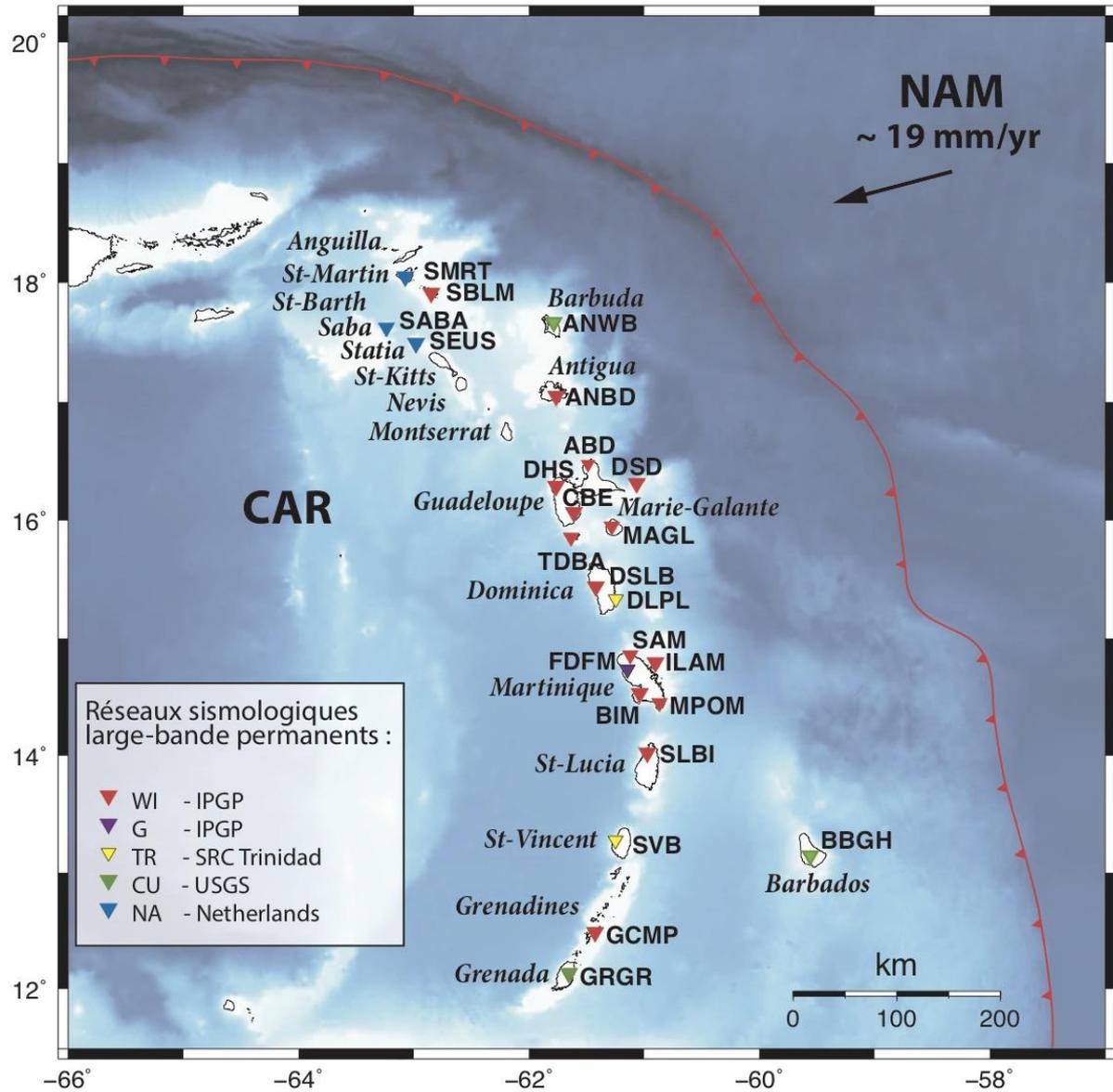
Les réseaux de sismomètres large-bande permettent l'enregistrement à grande distance des ondes sismiques générées par les grands tremblements de terre. Ils permettent de mener des études sismologiques dans des domaines de fréquence non pris en compte par les sismomètres courte-période (tenseur des moments,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

A l'OVSM, les réseaux sismologiques régionaux large-bande utilisés pour la caractérisation de la sismicité régionale s'étendent des îles de Saint Martin et de Saint Barthélemy au nord de l'arc des Petites Antilles jusqu'à l'île de Tobago au sud (**Figure 31**). Des échanges de données ont lieu depuis plusieurs années entre l'OVSM en Martinique, l'OVSG en Guadeloupe et le Seismic Research Centre (SRC-UWI) basé à Trinidad et Tobago.

Grâce à un hub satellitaire, les analystes de l'OVSM peuvent utiliser en temps réel les données des stations à transmission par satellite de l'OVSG (réseau **WI**) et du SRC (réseau **TR**) pour le travail de localisation, ainsi que les données de 3 stations néerlandaises du KNMI (réseau **NA**) et de 3 stations de l'USGS (réseau **CU**) co-opérées par le SRC-UWI (**Figure 31**). Les données des 4 stations sismologiques à transmission satellitaire basées en Martinique et appartenant au réseau **WI** (West-Indies) sont partagées en temps-réel par le même biais (**SAM, ILAM, BIM et MPOM**).

Les données de ce réseau WI sont distribuées en temps réel à la communauté scientifique et contribuent à l'alerte montante du système de surveillance des tsunamis de la Caraïbe (SATCAR).

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



**Figure 31.** Localisations des stations sismologiques des réseaux régionaux permanents utilisés à l’OVSM-IPGP (WI, G, TR, CU et NA) pour la caractérisation de la sismicité régionale à l’échelle de l’arc des Petites Antilles (modifié d’après Corbeau et al., 2021).

## VII. 2. Le réseau sismologique de Martinique

Le réseau local de Martinique (**MQ**) est composé de 13 stations sismologiques qui permettent la caractérisation de la sismicité locale (**Figure 32**) et qui viennent densifier les réseaux **WI** et **G** décrits dans la section précédente pour la caractérisation de la sismicité régionale.

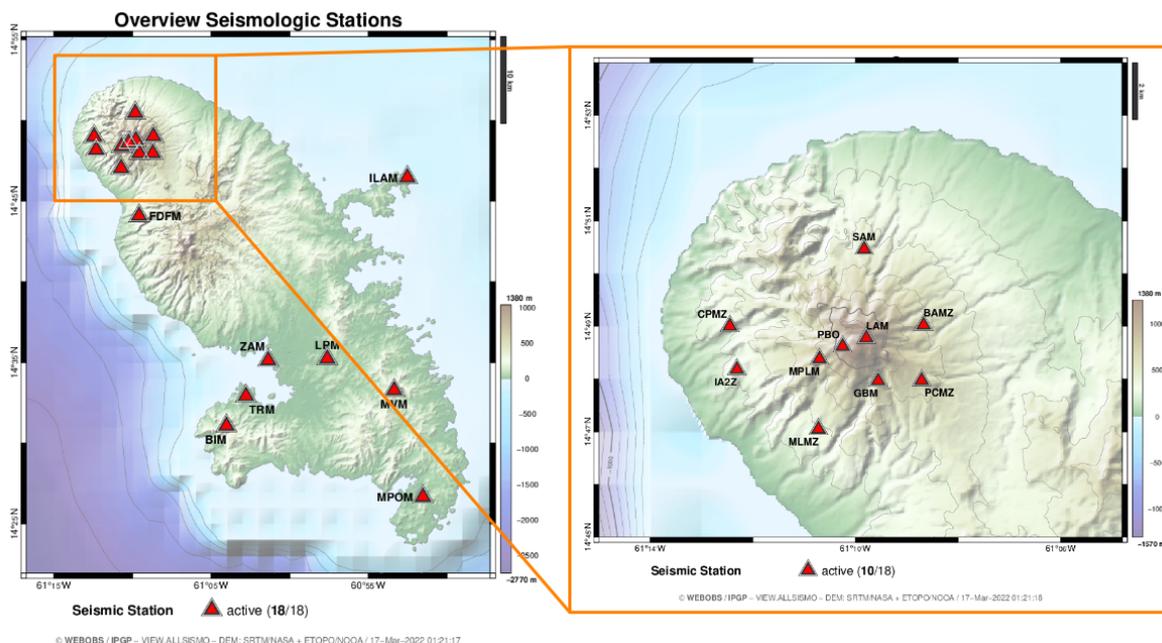
Sur ces 13 stations, l'OVSM-IPGP opère 4 stations sismologiques large-bande (**ZAM**, **LPM**, **TRM** et **MVM**) localisées au sud de la Martinique et 9 stations localisées au niveau de la Montagne Pelée. Les stations sont généralement installées dans des endroits isolés afin de ne pas être polluées par les vibrations générées par l'activité humaine.

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

De ce fait, l'OVSM-IPGP a entrepris depuis deux ans 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 était composé de 8 stations numériques large-bande à 3 composantes (**MPLM**, **PBO**, **LAM**, **GBM**, **MLM**, **CPM**, **BAM**, **IA2**) et d'une station analogique courte-période (**PCM**).



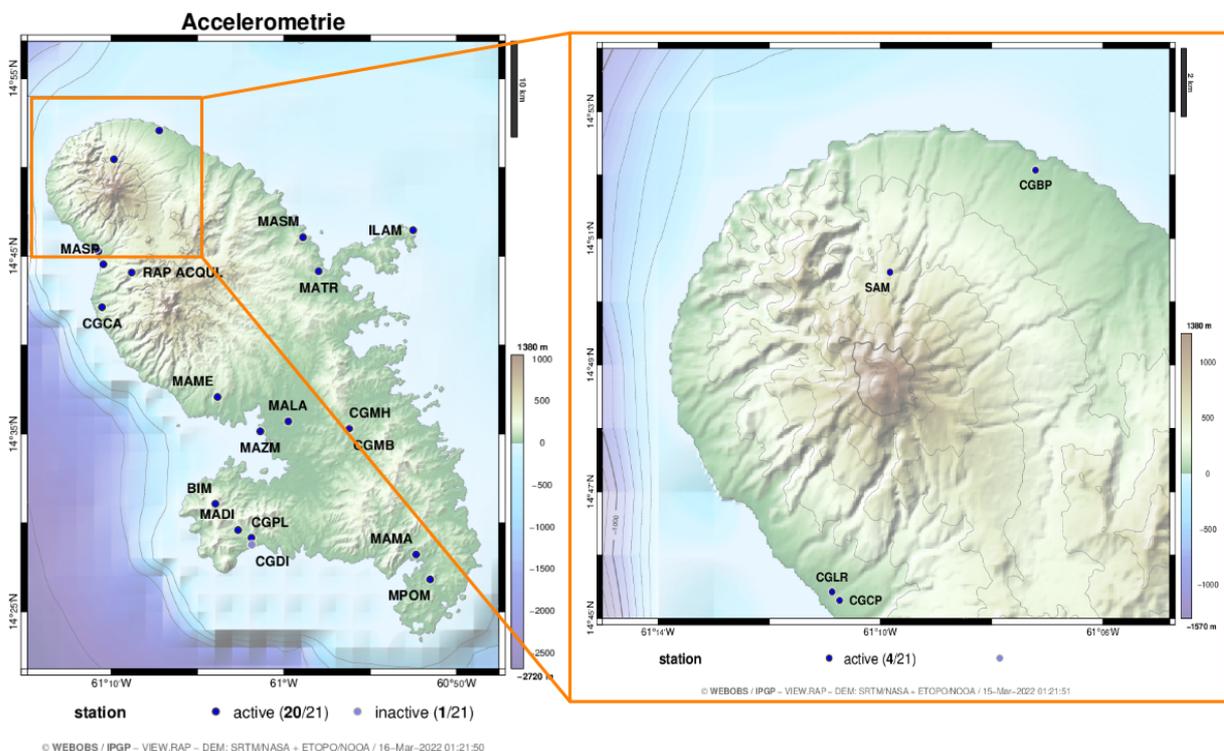
**Figure 32.** Réseau sismologique permanent de la Martinique (à gauche) et zoom sur la Montagne Pelée (à droite).

### VII. 3. Les réseaux accélérométriques de Martinique

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

En Martinique, les réseaux accélérométriques comprennent 19 stations actives dont la majorité appartient à des collaborateurs (**Figure 33**). L'OVSM-IPGP possède 4 accéléromètres au niveau des stations large-bande du réseau **WI** (SAM, ILAM, BIM, MPOM). Le Réseau Accélérométrique Permanent (**RAP**) met à disposition 8 stations (MADI, MALA, MAMA, MAME, MASM, MASP, MATR, MAZM) et la Collectivité Territoriale de Martinique 7 stations (CGCA, CGLR, CGCP, CGBP, CGPL, CGMH, CGMB).

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



**Figure 33.** Réseaux accélérométriques de la Martinique (à gauche) et zoom sur la Montagne Pelée (à droite).

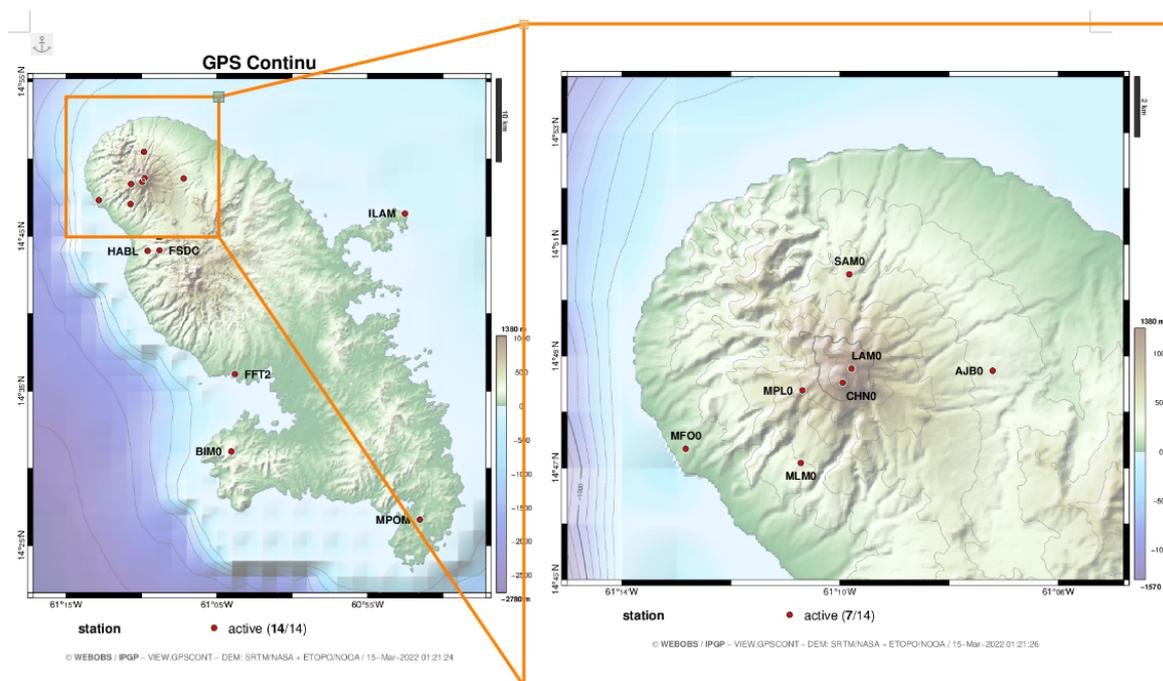
## VII. 4. Le réseau de suivi des déformations

### Réseau GNSS

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.

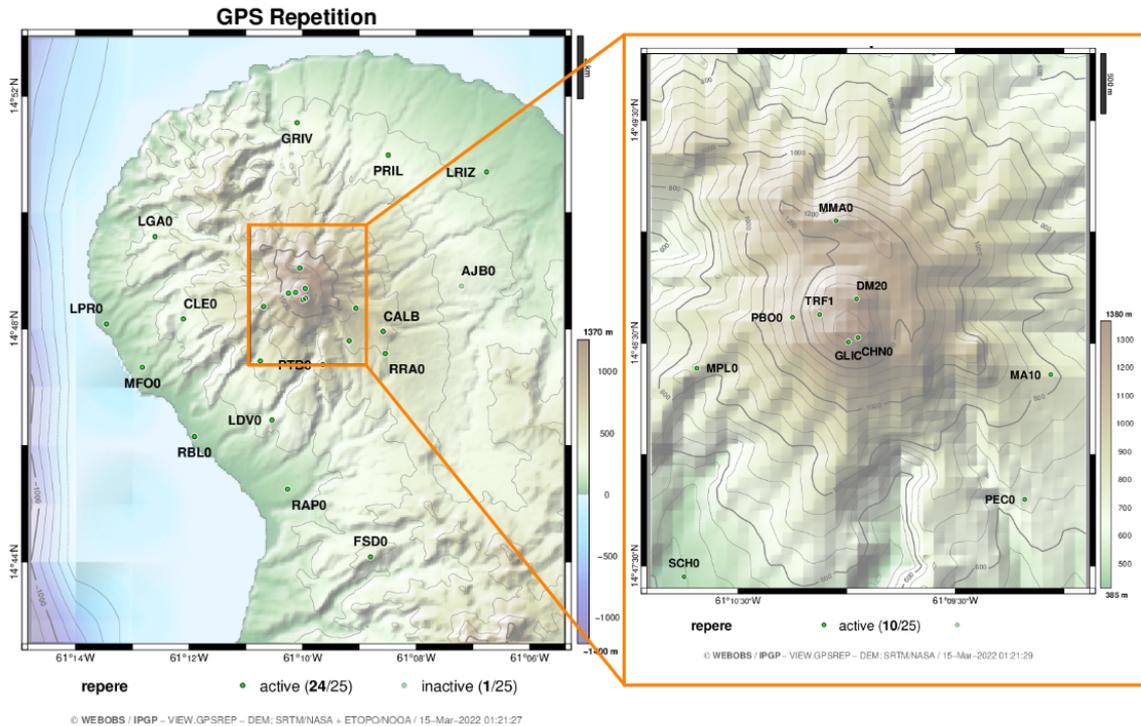
A l'OVSM-IPGP, les déformations sont mesurées grâce à un réseau GNSS (*Global Navigation Satellite System*) permanent, un réseau GNSS de répétition, ainsi que des inclinomètres de forage. L'ensemble des données enregistrées par le réseau GNSS permanent de l'OVSM-IPGP est traité quotidiennement, par session de 24h/30s, avec le logiciel scientifique GAMIT/GLOBK (Herring et al., 2010) et depuis novembre 2021, le traitement via GipsyX est utilisé en parallèle suite à la mise à jour du système de gestion des données.

En 2021, l'OVSM-IPGP a développé son réseau GNSS permanent. Initialement composé de 10 stations dont 4 au niveau de la Montagne Pelée (SAM0, LAM0, AJB0, MLM0), le réseau a été densifié par le passage en continu de 3 sites de mesures utilisés historiquement pour les campagnes GNSS de répétition (CHN0, MFO0, MPL0) (**Figure 34**). Suite à cette amélioration, la Montagne Pelée bénéficie dorénavant de 7 stations permanentes de surveillance des déformations.



**Figure 34.** Réseau GNSS continu de la Martinique (à gauche) et zoom sur les 7 stations de la Montagne Pelée (à droite).

De mars à avril 2021, la campagne GNSS de répétition a pu se dérouler sur 20 sites géodésiques dont 4 nouveaux sites de mesures (GLIC, GRIV, LRIZ, PRIL) (**Figure 35**).



**Figure 35.** Réseau GNSS de répétition mesuré annuellement au niveau de la Montagne Pelée.

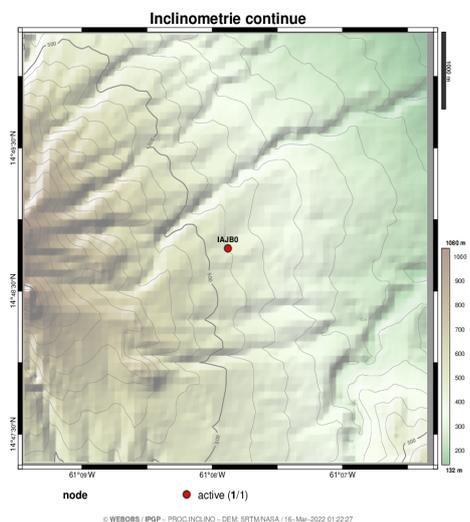
## Inclinométrie

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

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

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

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

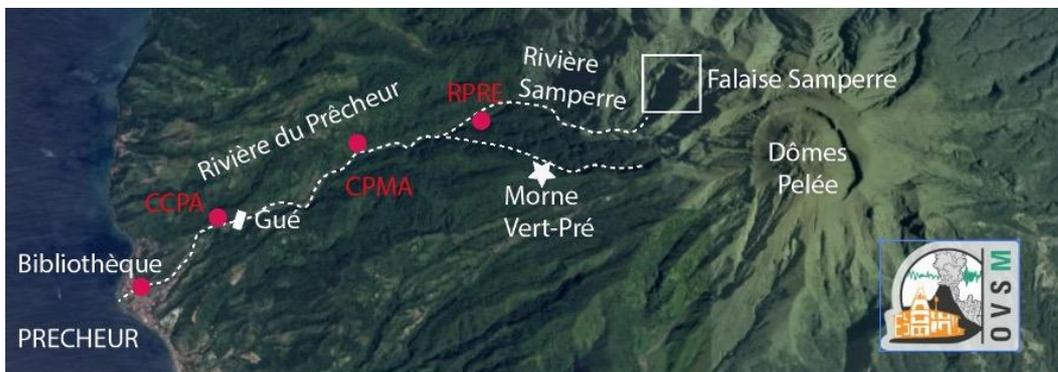


## VII. 5. Le système de détection automatique des lahars de la rivière du Prêcheur

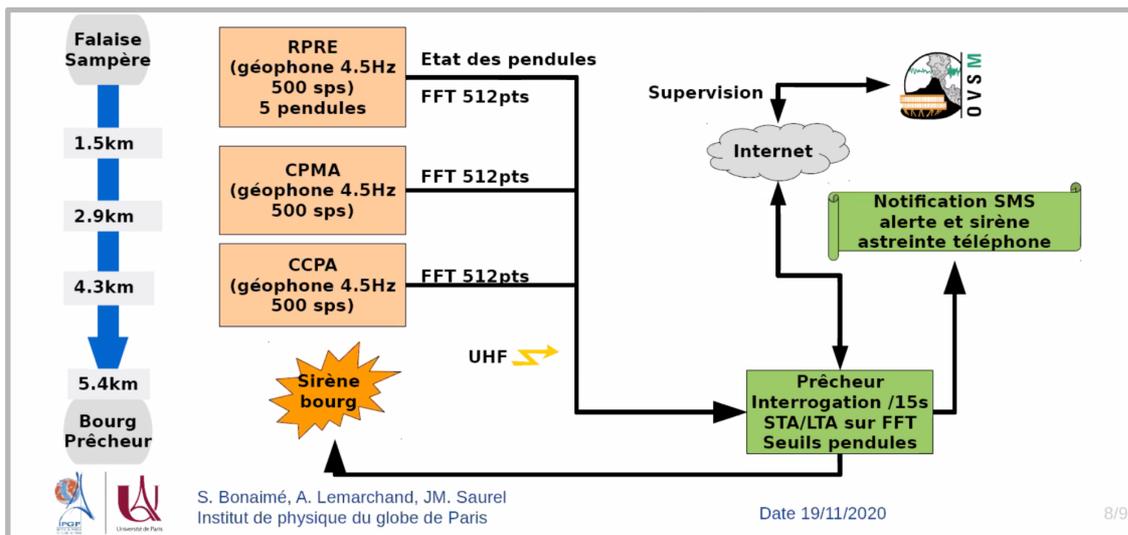
La rivière du Prêcheur est équipée d'un système de détection automatique des coulées de boues ou lahars (terme d'origine indonésienne), constitué d'un module principal qui comprend trois géophones (RPRE, CPMA, CCPA) et d'un système secondaire de détection des coulées les plus fortes à base de cinq capteurs pendulaires (RPRE) (**Figures 36 et 37**). L'ensemble de ces données étant traité par une centrale d'acquisition à la Bibliothèque du Prêcheur (BIBLIO)

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

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



**Figure 36.** Localisation de la rivière du Prêcheur, de la rivière Samperre et de la falaise Samperre. Les géophones du système principal de détection automatique des lahars de l'OVSM IPGP sont représentés par des points rouges et le site d'observation visuelle et par caméra de Morne Vert-Pré par l'étoile blanche.



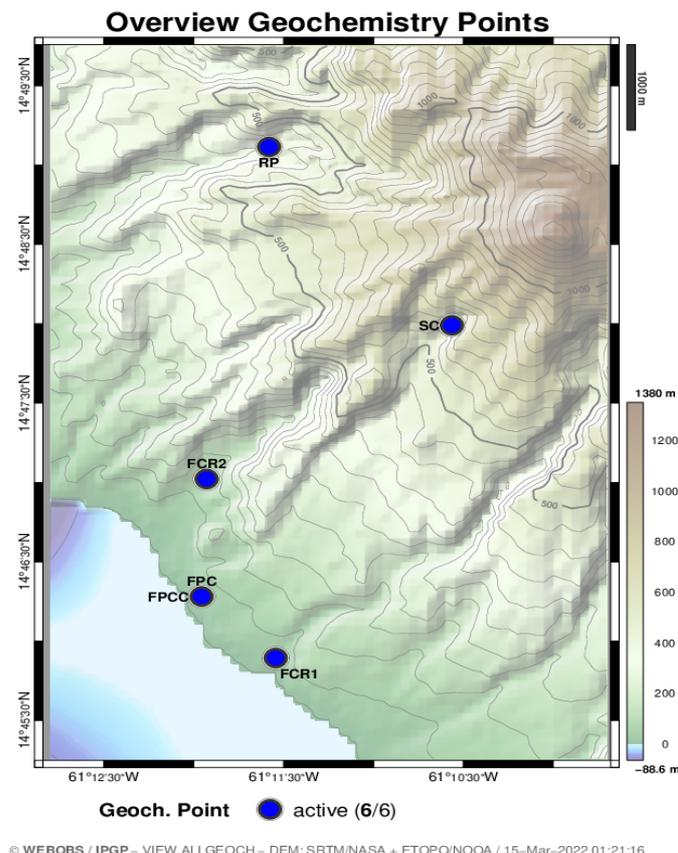
**Figure 37.** Système de détection automatique des lahars de la rivière du Prêcheur maintenu par l'OVSM IPGP.

## VII. 6. Le réseau de suivi géochimique de la Montagne Pelée

**Figure 38.** Localisation des points de prélèvements géochimiques réguliers effectués par l'OVSM-IPGP autour de la Montagne Pelée : Sources Chaudes (SC), Puits Chaud (FPCC), le point de prélèvement de la rivière du Prêcheur (RP) et les deux nouveaux points de prélèvements au niveau de forages de carrières (FCR1 et FCR2).

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 (Section V.5).

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 38). En 1979, le laboratoire d'analyse des eaux à l'OVSG devient opérationnel et rend possible l'analyse systématique de paramètres additionnels tels que les concentrations en ions (anions, cations).



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

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

Des prélèvements manuels mensuels ont lieu sur les sites de la rivière du Prêcheur (RP), du forage Puits Chaud (FPC) et des forages de carrières (FCR1, FCR2). 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 de la Montagne Pelée, la fréquence d'échantillonnage a été augmentée à environ 4 à 6 par an. Les échantillons sont expédiés à l'OVSG-IPGP où une équipe de géochimie effectue les analyses en ions majeurs. Les analyses en concentration et en rapport isotopique du carbone inorganique dissous sont effectuées à Paris au Laboratoire de Géochimie des Isotopes Stables de l'IPGP.

## VII. 7. Interventions sur les réseaux de surveillance et de mesures en 2021

Au cours de l'année 2021, l'OVSM a réalisé près d'une centaine d'interventions sur ses différents réseaux de surveillance pour assurer leur jouvence, leur développement et leur maintien opérationnel.

L'un des objectifs principaux a été la poursuite de la modernisation des stations analogiques en stations numériques du réseau sismologique de la Montagne Pelée installées entre 1976 et 1979 : BAM, CPM, GBM, IA2, MLM et PCM. La station GBM a été modernisée en 2020 et sur les 5 stations analogiques restantes, 4 ont été modernisées en 2021. Au niveau du réseau de déformation, 3 nouvelles stations GNSS permanentes ont été déployées.

Le réseau de suivi géochimique a été enrichi de 2 nouveaux points de prélèvements au niveau de deux forages de carrières (FCR1, FCR2). Ces points s'ajoutent aux prélèvements mensuels maintenus au niveau de la station "Puits Chaud" (FPC) et de la Rivière du Prêcheur. Les interventions à Sources Chaudes en amont de la rivière Chaude avec le soutien du Dragon 972 ont été intensifiées pour un suivi plus rapproché des paramètres géochimiques.

Les autres interventions (entretien, maintenance, remplacement, etc) effectuées sur l'ensemble des réseaux de surveillance ont assuré le maintien opérationnel de l'acquisition et de la transmission des données de l'ensemble des stations vers l'observatoire. De plus, dans le cadre de la convention liant le CEA et l'OVSM-IPGP, l'équipe technique a effectué les contrôles préventifs mensuels et les interventions exceptionnelles requises sur la station H05S du CEA située à Sainte-Anne.

Plusieurs événements exceptionnels ont marqué cette année 2021 et demandé à l'équipe technique et scientifique des interventions rapides :

- **en avril 2021**, suite à l'éruption explosive du volcan de la Soufrière de Saint-Vincent, l'OVSM-IPGP a fabriqué et déployé 6 collecteurs de cendres volcaniques en Martinique afin d'estimer la quantité de cendres retombées au sol. Un appel à témoignage auprès de la population a aussi été lancé, et une carte d'estimation des quantités de cendres a pu être construite.
- **en juin 2021**, un violent orage à foudroyé l'ancien bâtiment de l'OVSM, causant la perte de la réception des données d'une grande partie du réseau. L'OVSM a procédé à la réparation puis à la réinstallation d'une majorité des équipements dans le nouvel observatoire, et les activités de surveillance ont été poursuivies temporairement avec le soutien de l'OVSG le temps de la réhabilitation de la réception des données.
- **en septembre 2021**, le matériel de la centrale électrique solaire de la station MPOM du réseau sismologique régional WI a été volé (panneaux solaires, batteries, régulateur, etc). Dans l'attente de la réception de l'ensemble du matériel de remplacement, cette station reste à ce jour non opérationnelle.

## Réseau sismologique régional

Les stations VSAT (*Very Small Aperture Terminal*) du réseau sismologique régional WI (*West Indies*) sont au nombre de 4 sur la Martinique : **SAM, ILAM, BIM et MPOM** (Section VII.1).

Ces stations transmettent leurs données par voie satellitaire vers le HUB VSAT - localisé en 2021 à l'ancien Observatoire - celui du Morne des Cadets.

En 2021, 3 sites ont nécessité des interventions pour l'entretien de l'instrumentation de l'alimentation et la paramétrisation du système VSAT pour la transmission des données.

### ❖ Station **SAM**

*Février 2021* : Modification de la polarisation de l'antenne VSAT pour améliorer la transmission des données. Des suites des dégâts causés par les rongeurs : remplacement du câble et du numériseur du sismomètre, mise en place d'une gaine de protection et pose de protection supplémentaire (mastic anti-rats, grillage...).  
*Septembre 2021* : Entretien complet du site - débroussaillage de la végétation dense. Récupération du transmetteur pour investigation des redémarrages intempestifs. Récupération manuelle des données jusqu'à réinstallation du transmetteur.  
*Octobre 2021* : Réinstallation du transmetteur. *Décembre 2021* : Coupures persistantes dans les données en cours d'investigation. Problèmes d'alimentation et/ou de transmission suspectés.

### ❖ Station **MPOM**

*Janvier 2021* : Modification de la polarisation de l'antenne VSAT pour améliorer la transmission des données. *Juillet 2021* : Récupération du GPS continu pour installation sur SAM - GPS continu de TERIA (collaborateur) utilisé.  
*Septembre 2021* : **vol des modules d'alimentation à la suite d'une intrusion avec effraction**. Constat sur place effectué avec la gendarmerie de Sainte-Luce des pertes matérielles et des dégradations : 4 panneaux solaires, 10 batteries, 1 régulateur solaire, infrastructure électrique et alimentation du GPS de TERIA.  
Autre point relevé : les câbles de l'instrumentation sont rongés par les nuisibles.  
*Novembre 2021* : L'OVSM a passé commandes pour l'acquisition du matériel de remplacement afin de réhabiliter dans les meilleurs délais cette station.

### ❖ Station **ILAM**

*Février 2021* : Mise en conformité de la station solaire avec l'ajout 5 batteries 110Ah.  
*Septembre 2021* : Paramétrage sur site du transmetteur pour la réception des données à l'observatoire. Ajustement des fréquences suivant la directive de l'opérateur Canadien Nanometrics effectué depuis le nouvel observatoire.

### ❖ **HUB VSAT**

*Juin 2021* : Des suites de la foudre au niveau de l'ancien observatoire, la plateforme de réception des données des stations VSAT a été endommagée. Les HUB de la Guadeloupe (OVSG) et de Trinidad et Tobago (SRC-UWI) ont pris le relais.  
*Juillet-Août 2021* : Suite aux investigations, 2 "*Splitter/Combiner*" sont hors service. En conséquence 2 des 6 segments du réseau ne sont accessibles que depuis l'OVSG et le SRC-UWI. La réhabilitation complète du HUB nécessite de remplacer le matériel en défaut et d'effectuer le déménagement de l'ensemble du HUB dans le nouvel observatoire.

## Réseau sismologique de Martinique

Les stations du réseau sismologique local MQ (*Martinique*) sont au nombre de 13 (voir *Section VII.2*). Ces stations transmettent leurs données par voie hertzienne à l'observatoire.

En 2021, 6 sites ont nécessité des interventions notamment pour la modernisation du réseau avec le remplacement de stations analogiques par des stations numériques et l'amélioration des capteurs mono-composante et/ou courte-période par des capteurs large-bande 3 composantes - rénovation de **BAM, CPM, MLM, IA2** - détails ci-après.

### ❖ Station **IA2**

*Janvier 2021* : Entretien pour le maintien opérationnel (alimentation).  
*Août 2021* : Modernisation de la station - remplacement du numériseur numérique et changement du capteur courte-période en large-bande, 3 composantes. Maintenance du réseau pour l'acquisition des données à l'observatoire (transmission...)

### ❖ Station **CPM**

*Janvier 2021* : Réparation de la carte électronique analogique et communication radio.  
*Juin 2021* : Modernisation de la station - remplacement complet de la station analogique courte-période 1-composante par une station numérique large-bande 3 composantes. *Juillet 2021* : Renforcement de la structure (haubanage). Découplage alimentation électrique avec la station météorologique (Pluviomètre). *Septembre 2021* : Problème de transmission radio. Transmission d'une composante pour palier.

### ❖ Station **MVM**

*Avril 2021* : Remplacement du numériseur

### ❖ Station **PBO**

*Juillet 2021* : Remplacement du numériseur et de sa carte mémoire

### ❖ Station **BAM**

*Juillet 2021* : Modernisation de la station - mission hélicoptérée avec le soutien du Dragon 972 - remplacement complet de la station analogique courte-période 1-composante par une station numérique large-bande 3 composantes.  
*Septembre 2021* : Validation finale de la transmission WIFI

### ❖ Station **MLM**

*Juillet 2021 - Août 2021* : 2 jours pour la modernisation de la station - remplacement complet de la station analogique courte-période 1-composante par une station numérique large-bande 3 composantes.

### ❖ **Serveurs de l'observatoire - réception et traitement des données**

L'OVSM-IPGP assure la bonne transmission et le traitement des données enregistrées et envoyées par les stations du réseau (équipe technique - pôle informatique, système-réseau). La modernisation des stations sismologiques a nécessité des interventions au niveau des serveurs.

*Août 2021* : Serveur EarthWorm de traitement automatique - Intégration dans la base de données des canaux large bande des 4 nouvelles stations numériques. Module d'alarme RSAM - mise à jour pour l'intégration de nouvelles stations dans l'algorithme de génération automatique de SMS d'alerte en cas de séisme fort détecté.

## Réseaux accélérométriques

Les réseaux accélérométriques de la Martinique sont au nombre de 3 pour un total de 19 stations. L'OVSM maintient son réseau et collabore avec le RAP et la CTM pour le maintien de leurs réseaux respectifs (voir *Section VII.3*).

En 2021, 5 stations ont nécessité des interventions. Une station du réseau WI de l'OVSM-IPGP, une station du réseau RAP et 3 stations du réseau de la CTM.

❖ OVSM : Station **SAM**

*Octobre 2021* : Remplacement préventif du numériseur pour cause de perte intempestive de données. Mise à jour de la configuration du serveur NAQS pour la réception des données.

❖ RAP : Station **MASM**

*Août 2021* : Suite au changement de propriétaire de la parcelle. Retrait de l'accéléromètre pour cause de travaux du nouveau propriétaire. Nécessité de réactualiser la convention avec le nouveau propriétaire pour la réinstallation de la station.

❖ CTM : Station **CGBP**

*Octobre 2021* : Remplacement du numériseur défectueux.

*Novembre 2021* : Nouvelle perte de la station - investigation en cours.

❖ CTM : Stations **CGMH** et **CGMB** du barrage de la Manzo

*Janvier 2021* : Réception du nouveau matériel. *Juin 2021* : Remise en route des 2 stations. *Septembre 2021* : Perte des stations. Diagnostic de la station mère CGMH (station Manzo Haut) - défaut du boîtier de communication.

*Octobre 2021* : Réhabilitation des stations - remplacement du boîtier défectueux pour CGMH et resynchronisation de la station CGMB (station Manzo Bas).

## Réseaux de déformation

Les stations du réseau de déformation permanent sont au nombre de 13 stations GNSS et d'une station avec 3 inclinomètres (voir **Section VII.4**).

L'IPGP procède aussi chaque année à une campagne de mesure sur des sites complémentaires - "de répétition" - avec l'équipe technique de l'observatoire.

En 2021, 6 sites permanents ont nécessité des interventions notamment pour le passage en continu de 3 sites.

❖ Station **AJB0**

*Mars 2021* : Mise en place d'une borne 4G pour la transmission des données.

*Novembre 2021* : Mise en conformité du coffret d'instrumentation et entretien du site.

❖ Station **MFO0**

*Février 2021* : Installation de l'instrumentation et de l'alimentation de la nouvelle station GNSS permanente.

*Mars 2021* : Installation de la liaison WIFI pour la transmission des données à l'observatoire.

❖ Station **MPL0**

*Mars 2021* : Mission hélicoptée avec le Dragon 972. Installation complète d'une station GNSS permanente (Capteur, Numériseur, Central Solaire, Borne WIFI...).

❖ Station **CHN0**

*Avril 2021* : Mission hélicoptée avec le Dragon 972. Installation complète d'une station GNSS permanente (Capteur, Numériseur, Central Solaire, Borne WIFI...).

❖ Station **SAM**

*Mai 2021* : Changement d'antenne GNSS.

*Septembre-Décembre 2021* : Récupération manuelle des données suite à des problèmes d'énergie (corrigés début 2022).

❖ Station **IAJB0**

*Décembre 2021* : Perte de la station suite à une corruption de la carte mémoire et défaut du capteur GPS (résolu en Janvier 2022).

## Campagne de mesure sur les sites de GPS de répétition

*Mars-Avril 2021* : Mesures de l'IPGP avec l'équipe de l'OVSM sur 20 sites géodésiques temporaires : **CALB, CLEO, DM20, FSD0, GLIC, GRIV, LDV0, LPR0, LRIZ, MA10, MAMA0, PBO0, PEC0, PRIL, PTB0, RAP0, RBL0, RRA0, SCH0** et TRF1.

## Système de détection automatique de lahars de la rivière du Prêcheur

Les stations du système de détection automatique de lahars sont au nombre de 4 stations, 3 d'acquisition de données (Amont vers l'aval - RPRE, CPMA, CCPA) et 1 pour le traitement des données (BIBLIO) (voir **Section VII.5**).

Juillet 2021 : un survol de la rivière a été effectué pour contrôle avant la saison cyclonique.

❖ Station **RPRE**

*Novembre 2021* : Mission d'entretien du site, hélicoptérée avec le concours du Dragon 972 et menée par la société CAN Caraïbes. Elagage et débroussaillage de la rive ayant les panneaux solaires pour le rétablissement de l'alimentation et la récupération complète de la station (perte de communication prolongée sur plusieurs jours relevée).

❖ Station **CPMA**

*Septembre 2021* : Suite à la réparation du matériel. Remplacement du module de communication radio endommagé des suites de la foudre de l'orage de Juin 2021.

*Novembre 2021* : Entretien de la station (élagage) pour la récupération complète de la communication (coupure dans les données du sismomètre relevée). Blocage du géophone à une valeur maximale, résolu après redémarrage du logiciel de la station de traitement à la Bibliothèque.

❖ Station **CCPA**

*Novembre 2021* : Entretien préventif du chemin d'accès et de la station (élagage). Interruption dû au défaut à CPMA constaté risquant de déclencher la sirène, retour à la normale après redémarrage du logiciel de la station de traitement à la Bibliothèque.

❖ Station **BIBLIO**

*Novembre 2021* : Des suites du défaut constaté à **CPMA**, redémarrage matériel (ON/OFF) effectué créant un déclenchement intempestif de la sirène d'évacuation. Mairie du Prêcheur avertie et logiciel investigué pour amélioration (déployée début 2022). Redémarrage du logiciel effectué pour retour à la normale.

## Stations Météorologiques

L'OVSM-IPGP possède une station météorologique au niveau du deuxième refuge de la Montagne Pelée (**LAM**) et a procédé à l'installation d'un pluviomètre au niveau d'une station de la rivière du Prêcheur (**CPMA**).

❖ Station **CPMA**

*Mars 2021* : Installation du pluviomètre et configuration de la centrale d'acquisition Campbell pour transmission en temps réel des données.

❖ Station **LAM**

*Novembre 2021* : Maintenance au niveau de l'alimentation pour la récupération de la station (nettoyage panneaux solaires, anémomètre, capteur humidité, contrôle tension des batteries).

## Réseau de suivi géochimique de la Montagne Pelée

Les sites de mesures pour les paramètres géochimiques sont passés de 3 à 5 en 2021 avec le relevé régulier au niveau de forage de carrière **FCR1** et **FCR2** (voir **Section VII.6**).

*Janvier 2021* : Puits Chaud Continu (**FPCC**) - défaut de la sonde de profondeur. Correction problème de masse sur le module d'acquisition.

*Avril 2021* : Entretien des sondes du forage (nettoyage, contrôle visuel).

*Mai 2021* : Ajout de deux nouveaux sites de prélèvement. **FCR1** Forage Carrière N°1 (accès Morne Lénard, profondeur ~ 50m) et **FCR2** Forage Carrière N°2 (carrière Fond Canonville, profondeur ~ 60m).

*Juin 2021* : Module de transmission endommagé par la foudre au niveau de la station et de l'ancien observatoire. Récupération manuelle des données jusqu'à la réhabilitation de la transmission.

*Septembre 2021* : Installation d'une sonde de mesure continue de la température pour le suivi de la source chaude n°4 (**Figure 39**).

*Octobre 2021* : Installation d'un nouveau transmetteur au niveau de la station **FPCC**.

### Fréquences des interventions pour les prélèvements

*Mensuelle* : Rivière du Prêcheur (RP), Puits Chaud (FPC), Forage Carrière N°1 (FCR1)

*Bi-mensuelle* : Forage Carrière N°2 (FCR2)

*Trimestrielle* : Mission Hélicoptérée aux Source Chaude (SC) notamment n°4.

Les échantillons prélevés sont envoyés pour analyse en Guadeloupe, à Paris ou à Rennes pour des analyses ioniques (anions, cations), isotopiques (Sr, C, Cl...) de gaz dissous. A noter une augmentation des interventions à SC4 par rapport à 2020 (quasi doublé).



**Figure 39.** Sonde de mesure continue de la température installée au point n°4 des Sources Chaudes (SC4)

## Zones de phénoménologie

L'OVSM surveille deux types de phénomènes liés à l'édifice volcanique (voir *Section V.3*). En 2021, plusieurs interventions ont été menées sur ces zones avec le soutien de la sécurité civile via les missions hélicoptérées avec le Dragon 972 et la présence de pompier(s) de l'équipe du STIS pour les zones de végétation dégradée ainsi que le Parc Naturel Marin (PNM) de Martinique pour les relevés sur la zone de dégazage en mer.

### ❖ Zone de **Végétation Dégradée**

*Février 2021* : Mission hélicoptérée avec le concours du Dragon 972 et du STIS. Repérage de la zone, Observation de la dégradation.

*Mars 2021* : Mission hélicoptérée avec le concours du Dragon 972 et du STIS. Mesure des concentrations notamment de CO<sub>2</sub> avec instrumentation portative. Pose de 6 tiges d'extensométrie pour mesure des changements de fracture.

*Mai 2021* : Mission hélicoptérée avec le concours du Dragon 972 et du STIS. En partenariat avec l'IPGP (Paris) et les autres observatoires de la Guadeloupe (OVSG) et de la Réunion (OVPF). Mesure concentration de gaz (CO<sub>2</sub>...) avec chambre d'accumulation (cloche ancrée dans le sol), mesure multigaz (Dragør X-am 5600).

*Juillet 2021* : Mission hélicoptérée avec le concours du Dragon 972 et du STIS. Mesure concentration de gaz (CO<sub>2</sub>...) avec chambre d'accumulation (cloche ancrée dans le sol), mesure multigaz (Dragør X-am 5600), mesure des écartements des tiges au niveau des fractures et prélèvements organiques (fougères...).

### ❖ Zone de **Dégazage en Mer**

*Août 2021* : Premières explorations - détermination superficielle de la zone et mesure de température de référence.

*Septembre 2021* : Deux interventions pour le suivi des évolutions de la zone (superficielle, température, pH).

*Octobre 2021* : Mission avec le concours du Parc Naturel Marin (PNM) de Martinique et de l'équipe de l'observatoire de la Guadeloupe (OVSG-IPGP). En complément des mesures manuelle de température, superficielle et pH, caractérisation de colonne de gaz via une sonde multi-paramètres (température, salinité, turbidité, O<sub>2</sub>, pH, fluorescence) et échantillonnage du gaz en sortie (ampoule de gaz).

*Décembre 2021* : Mission avec le concours du Parc Naturel Marin de Martinique (PNMM). Mesure manuelle de la température, mesure via sonde multi-paramètres (température, salinité, turbidité, O<sub>2</sub>, pH, fluorescence) et estimation du débit.

## Autres Interventions

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

- ❖ Station **H05S** - Localisation : Sainte-Anne - Propriétaire : CEA  
7 contrôles préventifs mensuels et 4 interventions exceptionnelles.
- ❖ Station **FDFM** - Localisation : Observatoire - Propriétaire : GEOSCOPE  
*Septembre 2021* : Suite à la réception du matériel. Remplacement de 2 antennes GPS et de leurs supports endommagés suite à la foudre de l'orage de Juin 2021. Expédition de matériel de mesure à Strasbourg (dalle de granite, ...).
- ❖ Station **Sismique large bande Temporaire CR0M**  
*Janvier 2021* : Installation d'une station complète hors transmission (Panneau solaire, batterie, numériseur, sismomètre et boîtiers de protection.  
*Année 2021* : Récupération manuelle sur site des données pour traitement à l'observatoire. *Décembre 2021* : Station toujours en place.
- ❖ Station **Sismique large bande Temporaire AJB0**  
*Décembre 2021* : Installation d'un sismomètre et de son numériseur sans transmission sur le site de la station GNSS permanente. Récupération manuelle ponctuelle prévue pour analyse des données.
- ❖ Station **Sismique large bande Temporaire LGA0**  
*Décembre 2021* : Installation d'un sismomètre et de son numériseur sans transmission sur le site de GNSS de répétition. Récupération manuelle ponctuelle prévue pour analyse des données.
- ❖ **3 Antennes sismiques** - Densification du réseau pour étude approfondie de site  
**IA2** : *Janvier 2021* - Repérage. *Avril - Mai 2021* : Installation antenne sismique de 7 nodes (points de mesures) sur le site du Morne Julien au Prêcheur. *Juin 2021* : Récupération des données et retrait de l'antenne sismique.  
**LAM** : *Avril - Mai 2021* : Installation antenne sismique de 7 nodes (points de mesures) sur le plateau des palmistes entre le 2ème refuge et la crête du morne Macouba. *Juin 2021* : Récupération des données et retrait de l'antenne sismique.  
**MLM** : *Avril - Mai 2021* : Installation antenne sismique de 6 nodes (points de mesures). *Juin 2021* : Récupération des données et retrait de l'antenne sismique.
- ❖ **Collecteurs de cendres volcaniques** - Des suites de l'éruption de la soufrière de Saint-Vincent du 9 Avril 2021.  
*Avril 2021* : Réalisation de 6 collecteurs de cendres volcaniques (**C01, C02, C03, C04, C05, C06**). Déploiement respectif sur toute l'île à Saint-Pierre (observatoire), au Morne Vert (particulier), au Lamentin (aéroport, station ZAM), à Fort de France (Préfecture), au Prêcheur (particulier) et au Marigot (particulier). Les particuliers mentionnés faisant partie de l'équipe de l'OVSM.  
*Mai 2021* : Retrait de **C06** au Marigot pour observatoire.

## VII. 8. Évolution du système informatique en 2021

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

La modernisation du cluster initialement installé en 2012 a débuté en mars 2019 lors du déménagement de l’observatoire dans le nouveau bâtiment par l’acquisition par l’OVSM de 4 baies 42U avec un système de refroidissement optimal (**Figure 40**).

En 2021, la CTM a aménagé une nouvelle salle pour héberger les serveurs informatiques dans ces nouvelles baies. Le nouveau cluster est composé de :

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

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



**Figure 40.** Nouveau serveur cluster informatique de l’OVSM-IPGP.

**Figure 41.** Switch commandant les nouveaux RIPEX pour les stations rénovées BAM et CPM.



De nouvelles liaisons avec la technologie RIPEX ont été déployées lors de la rénovation des stations sismiques de la Montagne Pelée (**Figure 41**).

Et en novembre 2021, la plateforme web de la gestion de données de l’OVSM - WebObs (<https://ipgp.github.io/webobs/>) a été mise à jour de la version 2.1.1 à la version 2.4.1 permettant la fiabilisation et le développement de la plateforme (nouveaux outils, déploiement de GipsyX, etc).

## VII. 9. Archivage et distribution des données

Les données acquises quotidiennement par l'OVSM sont archivées, et la majorité d'entre elles sont distribuées en temps réel pour la communauté scientifique. Depuis fin 2015, les données sismologiques brutes et décimées des stations du réseau WI sont disponibles en temps réel depuis les serveurs seedlink du centre de données de l'IPGP, de RESIF, d'IRIS ; les données accélérométriques brutes des stations du réseau WI sont disponibles en temps réel sur le serveur seedlink de RESIF ; les données sismologiques et géodésiques brutes des stations de Martinique sont disponibles sur le portail Volobsis (<http://volobsis.ipgp.fr>) ; les données archivées et complétées sont disponibles depuis le centre de données de l'IPGP, de RESIF et d'IRIS au fur et à mesure de l'avancée des validations, les données lentes (géochimie, etc) sont sauvegardées aux observatoires volcanologiques à Paris ; les catalogues et bulletins de sismicité sont sauvegardés aux observatoires volcanologiques à Paris, et disponibles sur la page web de l'OVSM-IPGP.

Les tableaux suivants (**Tableaux 10 et 11**) donnent le nombre de Go de données sismologiques et géodésiques demandées auprès du centre de distribution de l'IPGP pour le réseau MQ et pour l'ensemble des stations du réseau WI.

Données sismologiques	WI		MQ	
	Nouvelles Données Archivées (Go)	Données Délivrées (Go)	Nouvelles Données Archivées (Go)	Données Délivrées (Go)
2017	162	1,143	93	149
2018	164	1,048	116	182
2019	205	1,200	122	137
2020	200	1,687	108	652
2021	152	1320	85	785

**Tableau 10.** Distribution des données sismologiques par le centre de données de l'IPGP.

Données GNSS	Nouvelles Données Archivées (Go)	Données Délivrées (Go)
2017	1.0	5.8
2018	0.8	1.0
2019	0.0	0.3
2020	0.0	0.9
2021	0.0	0.0

**Tableau 11.** Distribution des données géodésiques par le centre de données de l'IPGP.

## VIII. Activités diverses de l'OVSM

### VIII. 1. Formations, missionnaires et stagiaires

Le personnel de l'OVSM IPGP a pu suivre plusieurs formations au cours de l'année 2021 :

- **[2021-01-26 au 27] Valerie Minin – CTM CNFPT** Formation Hygiène des Locaux
- **[2021-03-24 au 26] Jordane Corbeau - Visio** - Formation IA-Deep Learning
- **[2021-05-26 1h30] Jordane Corbeau - Visio** - Auditions CNAP
- **[2021-07-05 au 09] Cyril Vidal, Frédéric Jadelus, David Melezan - Terrain Martinique** - Formation Drone
- **[2021-10-01 au 10] Jordane Corbeau - Paris** - Formation L'Oréal FWIS + remise prix
- **[2021-10-25 au 2021-11-05] Equipe OVSM** - Formation à WebObs
- **[2021-11-22 au 26] Valerie Minin – CTM CNFPT** - Formation d'intégration à la CTM
- **[2021-11-22 au 26] Julien Koziol, Cyril Vidal, Jordane Corbeau - Théorie à l'OVSM + Pratique en Mer** - Formation à l'utilisation du sondeur multi-faisceaux (SMF)
- **[2021-11- 10 & 17 (4h)] Doris Vatou - Visio** - Formation Yasmine

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 :

- **[2021-01- 01 au 05] Jean-Christophe Komorowski (IPGP)** -Mission de soutien et collaboration avec l'OVSM pour les scénarios éruptifs
- **[2021-03-19 (14:00)] Marc Peruzzetto**, travail avec l'OVSM sur les lahars de la rivière du Prêcheur.
- **[2021-03-22 au 2021-05-15] Jean-Bernard De Chaballier - Terrain** -  
- Campagne GPS de répétition avec le support de l'équipe de l'OVSM
- **[2021-05- 01 au 20] Guillaume Carazzo et Audrey Michaud-Dubuy - OVSM** -  
Mission dans le cadre de PREST (voir description dans la section sur le projet).
- **[2021-05-10 (09:30) - 2021-05-15 (12:15)] Séverine Moune - Terrain**  
- Échantillonnage avec l'OVSM et analyses géochimiques
- **[2021-05-10 (09:30) - 2021-05-21 (18:45)] Elodie Chilin (OVSG)**  
- Échantillonnage avec l'OVSM et analyses géochimiques
- **[2021-05- 16 au 21] Manuel Inostroza (OVSG)**  
- Échantillonnage avec l'OVSM pour des analyses géochimiques
- **[2021-07-05 - 2021-07-09] Sébastien Bonaimé + OVSG**  
- Formation Drone et formation sur la photographie

## RAPPORT ANNUEL OVSM - IPGP – 2021

- **[2021-08-23 au 2021-09-03] Jean-Marie Saurel (IPGP)**
  - Aide à la migration des serveurs sur les nouveaux clusters
- **[2021-10-23 au 2021-11-05] Jean-Marie Saurel (IPGP)**
  - Formation de Doris Vaton et installation du code PhaseWorm
- **[2021-10-23 au 2021-11-05] François Beauducel** - Formation WebObs de l'équipe de l'OVSM
- **[2021-11-15 au 2021-11-19] Sylvain Carré** - Visite annuelle - CEA

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

- **[2021-03- 22 au 26] Bryan Melezan (3ème B)**
  - Stage de 3ème collège Louis Delgres de Saint-Pierre encadré par Cyril VIDAL
- **[2021-03- 22 au 26] Maya-Jade Phazian**
  - Stage de 2nd générale LGT St Joseph de Cluny encadré par Benoît Zimmermann
- **[2021-03-22 au 26] Lauriane Thobor (3ème C)**
  - Stage de 3ème collège Louis Delgres de Saint-Pierre encadré par David Melezan
- **[2021-05-25 au 2021-07-02] Lylay Gros-Désormeaux**
  - Stage Licence 3 université de Paris- encadré par Fabrice FONTAINE
- **[2021-12- 13 au 17] Marisly Marquet, Gaspard Volchaert, Loulie Vidal-Accart**
  - Stage observation 3e3 (Collège du Carbet) encadré par Cyril VIDAL

## VIII. 2. Hygiène et sécurité

Au cours de l'année 2021, diverses actions ont été menées pour l'amélioration des conditions d'hygiène et de sécurité à l'OVSM. Le bâtiment dispose d'un défibrillateur semi-automatique pour lequel la mise à jour des équipements a été faite en mars 2020 (batterie, électrodes).

Concernant la crise sanitaire due à la Covid-19, l'OVSM a poursuivi la lutte contre la propagation du virus mettant en place les gestes barrières recommandés dans l'enceinte de l'établissement (affichage des consignes, mise en place d'un sens de circulation, adaptation de l'amphithéâtre pour le respect des distanciations physiques) et en fournissant le matériel de protection pour garantir au maximum la sécurité du personnel (masques chirurgicaux, gants, gel hydroalcoolique...). Aucun agent n'a été contaminé en 2021. Pour rappel, le 10 août 2021, à la suite de la saturation des établissements hospitaliers de l'île due à la quatrième vague et au faible taux de vaccination, la Martinique est repassée en confinement strict pour une période de 6 semaines (zone de libre circulation réduite à un kilomètre autour du domicile, sauf attestation dérogatoire). Un couvre-feu est toujours actif à l'heure actuelle.

Plusieurs actions de maintenance ont été menées au niveau des deux bâtiments (ancien et nouvel observatoires) pour en assurer le bon fonctionnement et la sécurité du personnel et du matériel. Le contrat d'assurance du nouveau bâtiment ayant été signé en mai 2021. En octobre 2021, un bilan de situation concernant les travaux à effectuer au niveau de la bache à eau a été réalisé.

Au niveau du nouvel observatoire, en février, l'évacuation des gaz d'échappement du groupe électrogène a été mise en place. En août, la maintenance du groupe électrogène a été effectuée, la climatisation a été mise en place dans la nouvelle salle des serveurs pour l'accueil à venir du HUB VSAT et la ligne téléphonique de l'ascenseur a été testée et réparée. En octobre, un diagnostic de la ligne téléphonique a été effectué.

Au niveau de l'ancien observatoire, en août, le second groupe électrogène a été maintenu (pression d'huile). En octobre, l'ancien onduleur a dû être réparé. En novembre, les volants roulants de l'entrée ont été maintenus et une porte a dû être remplacée car endommagée des suites de vents violents. Fait marquant : actes de vandalisme sur les murs et les volets de l'ancien bâtiment (fresque) ainsi qu'une tentative d'intrusion.

Concernant la protection contre le risque d'incendie, sismique et tsunami, la maintenance du Système de Sécurité Incendie (SSI) a été menée en janvier 2021. En mars 2021, l'exercice pour le risque tsunami "Caribe Wave" s'est tenu et la vérification des extincteurs a été effectuée. En novembre 2021, l'exercice d'évacuation du bâtiment en cas de séisme fort s'est tenu dans le cadre de la semaine Replik.

L'OVSM a acquis plusieurs équipements pour assurer la sécurité de son personnel. Achat en juillet de plusieurs EPI (équipement de protection individuelle) - chaussures, casques, gants - pour leur renouvellement et l'équipement des nouveaux arrivants. Acquisition de matériel de protection et de détection de gaz pour les interventions sur les zones de végétation dégradée : licence pour détecteur portatif Dräger (Gaz Vision 7), masques à gaz et leurs filtres. Mise en place d'une trousse de secours dans les 3 véhicules de terrain.

Dans le cadre de la préparation à la saison cyclonique, les communications satellitaires ont été testées avec la Préfecture de la Martinique, une nouvelle batterie a été reçue pour la valise satellitaire, un stock d'eau a été réalisé pour assurer l'autonomie de l'observatoire en cas de crise et un survol de la Rivière du Prêcheur a été effectué.

Par ailleurs, l'OVSM lutte contre les nuisibles sur le terrain mais également dans l'enceinte du bâtiment, et a mis en place un contrat annuel de dératisation et de désinsectisation avec une entreprise locale. En 2021, 4 opérations ponctuelles ont été menées pour lutter contre ces rongeurs.

### VIII. 3. Communications, colloques et publications

Le directeur de l'OVSM-IPGP, en plus d'assurer avec son équipe la publication des communiqués et des bulletins et de relayer en direct toutes les nouvelles informations sur les réseaux sociaux, a participé en février 2021 à **1 réunion publique** avec Monsieur le Sous-Préfet de La Trinité et de Saint Pierre et Monsieur le Maire du Carbet organisée dans la ville du Carbet. Cette réunion s'est déroulée dans une commune proche de la Montagne Pelée à la suite de son passage en niveau vigilance jaune. 7 autres réunions publiques avaient eu lieu en décembre 2020 dans d'autres villes à proximité de la Montagne Pelée.

- ❖ **JT de 19h de France 3** en janvier 2021 (Jadelus F., Zimmermann B. et F.R. Fontaine).
- ❖ **Arte**, émission *Invitation au voyage* sur la Montagne Pelée (9 décembre 2021)
- ❖ Fontaine F.R., 2021, Prédire l'effondrement des cratères volcaniques, ***Pour la Science***, n°519, janvier 2021, p54-62.
- ❖ Présentation de F.R. Fontaine lors de plusieurs **comités volcans de la Montagne Pelée** dans le cadre du travail de mise à jour du plan OrSec de la Montagne Pelée.
- ❖ Présentation de F.R. Fontaine à un **comité de vigilance volcan** à la mairie de Fonds Saint-Denis.
- ❖ Conférence de F.R. Fontaine, ***CARICOM/Regional Action on Disaster Risk Reduction and Management, Univ. West Indies***, 3 Mars 2021.
- ❖ Présentation de F.R. Fontaine devant les conseillers du CESECEM (janvier 2021)
- ❖ Conférence de F.R. Fontaine au CDST de Saint-Pierre (9 juillet 2021) : nouvelles observations géologiques associées à l'activité récente de la Montagne Pelée.
- ❖ Fête de la science (novembre 2021) au CDST de Saint-Pierre.
- ❖ Martinique Première Radio (édition du matin du 30 mars 2021, F.R. Fontaine).
- ❖ Martinique Première Radio (septembre 2021) sur l'éruption du volcan Cumbre Vieja aux Canaries (J. Corbeau).
- ❖ Documentaire de Martinique Première (juin 2021) sur St Vincent, la Montagne Pelée et Montserrat.
- ❖ Journal Télévisé de 19h de Martinique Première (9 avril 2021 lors de l'éruption explosive de la Soufrière de St Vincent).
- ❖ Journal Télévisé de 19h de viaATV du 3 février 2021
- ❖ Journal Télévisé de 19h de viaATV du 4 mai 2021 (F.R. Fontaine).
- ❖ L'invité du jour de la Première (F.R. Fontaine).
- ❖ RCI interview à la radio (exemple 4 février 2021) et site web (exemple le 12/07/2021).
- ❖ Boukan, le courrier ultramarin, n°6, 2021.
- ❖ Global Volcanism Program, 2021. Report on Pelee (France) (Bennis, K.L., and Venzke, E., eds.). Bulletin of the Global Volcanism Network, 46:7. Smithsonian Institution. <https://doi.org/10.5479/si.GVP.BGVN202107-360120>
- ❖ Site web du CESECEM: 10 réponses sur la situation actuelle de la Montagne Pelée, <https://www.cesecem.mq/2021/02/22/10-reponses-sur-la-situation-actuelle-de-la-montagne-pelee/>
- ❖ Présentation dans le cadre des séminaires de l'IPGP sur la thématique des risques naturels, F.R. Fontaine (janvier 2021).
- ❖ Conférence de F.R. Fontaine dans le cadre des conférences de l'association LAVE, juin 2021.
- ❖ France Antilles (par exemple : 9 août et une page spéciale le 25 août 2021).
- ❖ Interview de NordFM, 8 mai 2021 (F.R. Fontaine).

Le site Internet de l'IPGP (<http://www.ipgp.fr>) fournit des informations scientifiques et vulgarisées dans le domaine des Sciences de la Terre. Les pages spécifiques à l'OVSM ont été rédigées en 2014 et modifiées en 2020, et sont disponibles à l'adresse suivante : <http://www.ipgp.fr/fr/ovsm/observatoire-volcanologique-sismologique-de-martinique-ovsm-ipgp>.

L'ensemble des informations relatives à l'activité de la Montagne Pelée est disponible sur les différents médias de l'OVSM-IPGP :

- ❖ Le site internet : [ipgp.fr/fr/ovsm/actualites-communiques-publics-de-lovsm](http://ipgp.fr/fr/ovsm/actualites-communiques-publics-de-lovsm)
- ❖ Le compte Twitter : [twitter.com/ObsMartinique](https://twitter.com/ObsMartinique)
- ❖ Le compte Facebook : [facebook.com/ObsVolcanoSismoMartinique/](https://facebook.com/ObsVolcanoSismoMartinique/)

La photo de la Montagne Pelée prise depuis l'ancien bâtiment de l'observatoire toutes les 15 minutes est mise à la disposition du public sur la page de l'OVSM sur le site de l'IPGP (<http://www.ipgp.fr/fr/ovsm/montagne-pelee>).

Jordane Corbeau, physicienne-adjointe à l'OVSM-IPGP a publié un article scientifique portant sur les résultats de ses travaux de recherche sur la sismicité de l'arc des Petites Antilles (Corbeau et al., 2021).

### VIII. 4. Relations avec les autorités

L'observatoire travaille en partenariat avec les autorités locales pour l'ensemble des thématiques liées aux risques et à la connaissance de l'aléa :

- ❖ Pour la mise en œuvre du Plan Séisme Antilles avec la DEAL et le ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie (MEDDE) ;
- ❖ Pour les discussions sur la recherche en Martinique avec la délégation régionale à la recherche et à la technologie (DRRT) ;
- ❖ Pour l'actualisation des dispositifs ORSEC avec la Préfecture ;
- ❖ Pour les mises à jour des différents plans spécialisés (volcan et Rivière du Prêcheur) de la Préfecture avec le Service Interministériel de Défense et de Protection Civile (SIDPC).

## IX Projets et collaborations

### IX. 1. Collaboration avec l’OVSG, l’OVPF et l’équipe de Paris de l’IPGP

Au cours de l’année 2020, l’algorithme de détection automatique de séismes associé à l’activité de la Soufrière de Guadeloupe (OVSG) a été mis en place à l’OVSM-IPGP pour aider à la détection des séismes de la Montagne Pelée. Cet algorithme, basé sur la méthode de “Template Matching” ou d’apprentissage automatique, permet la reconnaissance automatique d’événements à partir de signaux sismiques de référence, avec la possibilité d’ajouter de nouveaux signaux de référence au cours du temps en cas de détection d’une nouvelle famille de séismes. En 2021, cet algorithme a été étoffé suite à la détection de plusieurs nouvelles familles de séismes volcano-tectoniques, et sert quotidiennement au suivi et à l’identification des séismes de la Montagne Pelée.

Au début du mois de novembre 2021, J.M. Saurel (IPGP) a implémenté sur les serveurs de l’OVSM le code de détection automatique PhaseWorm (Retailleau et al., 2022), développé à l’OVPF pour la détection des séismes volcano-tectoniques. En Martinique, ce code basé sur des algorithmes d’intelligence artificielle a été programmé pour détecter à la fois la sismicité volcano-tectonique de la Montagne Pelée mais aussi la sismicité locale et régionale. Il fournit, dans les secondes qui suivent un événement sismique, une localisation et une magnitude automatique, ainsi qu’un bulletin automatique B<sup>3</sup> dans le cas où le séisme pourrait avoir été ressenti. Les premiers mois de fonctionnement de cet algorithme sont prometteurs et les localisations automatiques fournies sont proches des localisations manuelles des opérateurs (Figure 42).

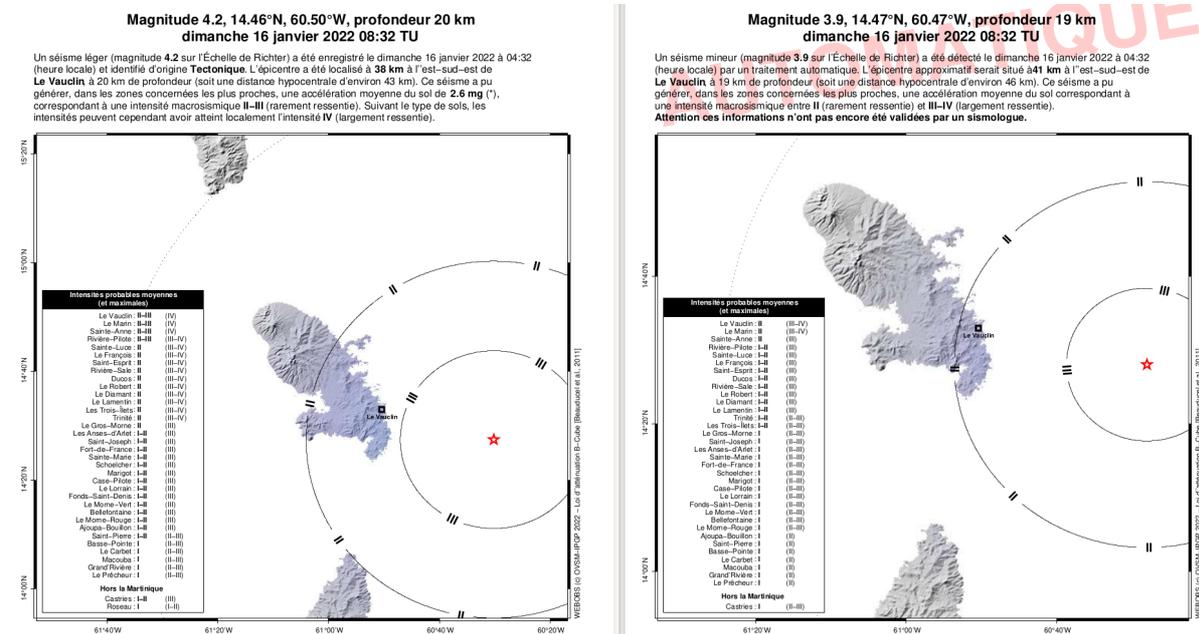
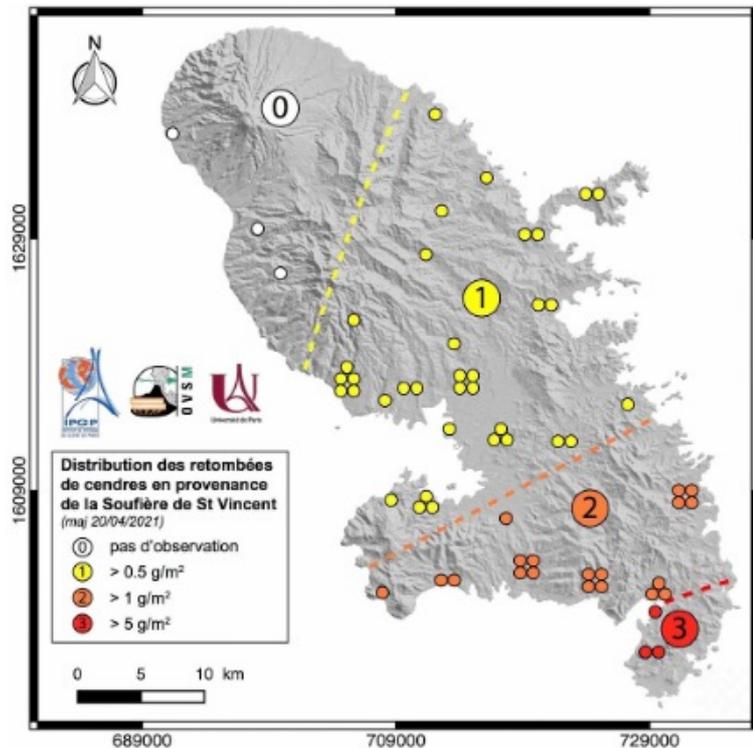


Figure 42. Comparaison de la localisation manuelle de l’OVSM pour le séisme du 16 janvier 2022 à 08h32 TU (à gauche) avec la localisation automatique produite par PhaseWorm (à droite).

## IX. 2. Collaboration régionale

Au niveau de la Caraïbe, l'OVSM participe quotidiennement à la distribution de ses données sismologiques et échange des informations scientifiques sur l'activité sismique et volcanique de la région avec le SRC basé à Trinidad comme par exemple lors de l'éruption de la Soufrière de Saint Vincent de 2020-2021. En outre, dans le cadre du projet de recherche PREST porté par l'OVSM, des échanges scientifiques réguliers ont lieu avec Haïti et Cuba.

**Figure 43.** Les nombreux témoignages reçus en Martinique permettent de présenter une carte préliminaire des retombées de cendres en provenance du volcan de Saint-Vincent. Travail réalisé en collaboration avec G. Carazzo et A. Michaud Dubuy (IPGP).



Les panaches de cendres de l'éruption de la Soufrière de Saint-Vincent de 2021 ont généré des retombées de cendres sur l'île de Saint-Vincent mais aussi sur plusieurs autres îles de la Caraïbe : Barbade, Sainte-Lucie, Guadeloupe, Montserrat et la Martinique. A partir des données relevées grâce aux collecteurs de cendres mis en place par l'OVSM et par l'analyse des témoignages transmis à l'OVSM par la population, une carte préliminaire des retombées de cendres en Martinique a pu être construite (**Figure 43**).

## IX. 3. Collaboration avec les universités

Un stage de Master 1 Hydrogéologie de l'Université de Montpellier a été réalisé par Sacha MAYET (encadré par P. Lachassagne et F.R. Fontaine) sur l'édifice volcanique de la Montagne Pelée en Martinique par une analyse comparée des mesures géophysiques et des caractéristiques hydrogéologiques du système hydrothermal de la Montagne Pelée.

Des observations hydrogéologiques ont été menées en collaboration avec P. Lachassagne (IRD, HydroSciences Montpellier) au niveau de la rivière des Pères (Saint-Pierre, Martinique).

Lors de l'année 2021, plusieurs étudiants de l'Université des Antilles ont pu dans le cadre de leur stage de Master se rendre à l'OVSM-IPGP pour compléter leurs travaux de recherche.

## IX. 4. Projet PREST

Le projet **PREST** (vers la Plateforme Régionale de Surveillance Tellurique du futur) a été déposé par l'OVSM auprès du Programme Interreg Caraïbe V 2014-2020 en février 2017. Le comité de sélection a retenu le projet en juin 2017. Il s'agit d'un projet d'envergure ayant pour partenaires nationaux l'IRD, le CNRS, l'ENS, l'ESEO, le GET, et comme partenaires extra-communautaires le BME et l'UEH en Haïti et le CENAIIS à Cuba. Ce projet a été prolongé et sera clôturé à la fin du premier semestre 2022.

L'objectif du projet PREST est de réaliser une plateforme de recherche régionale en géosciences pour mieux comprendre les aléas telluriques qui menacent les Grandes et Petites Antilles en développant des technologies marines innovantes, des échanges de savoir-faire et des collaborations inter-îles en interaction avec les meilleurs spécialistes français, européens et américains. Cette plateforme bénéficie du bâtiment ultra-moderne de l'Observatoire Volcanologique et sismologique de Martinique (OVSM-IPGP) comme point focal et support logistique.

L'année 2021 a été difficile du fait de la poursuite de la pandémie Covid-19 qui a reporté nombre de missions et de colloques. Toutefois, au moins 6 articles scientifiques ont été publiés ou soumis et 6 présentations ont été données.

### WP3 Haïti

Soumission d'un article à *Science* sur le séisme de magnitude 7.2 qui s'est produit le 14 août 2021 à Haïti. Dans cet article, les auteurs utilisent le réseau de Raspberry Shake déployé chez des habitants pour contraindre ce séisme.

#### **La « sismologie citoyenne » aide à décrypter le tremblement de terre majeur de 2021 en Haïti**

Le 14 août 2021, 11 ans après le tremblement de terre majeur de 2010 en Haïti, un nouveau séisme majeur de magnitude 7.2 se produit en Haïti sur la prolongation à l'ouest du même système de failles que son prédécesseur dévastateur. Ce séisme de 2021 a frappé le pays lorsque l'accès au terrain était limité par l'insécurité et que les sismomètres du réseau national étaient inopérants. Un réseau de « sismomètres citoyens » installé chez des particuliers volontaires en 2019 a fourni des données en champ proche essentielles pour comprendre rapidement le mécanisme du choc principal et surveiller sa séquence de répliques. Leurs données en temps réel définissent deux groupes de répliques qui coïncident avec deux zones de glissement cosmique déterminées à partir de l'inversion de données sismologiques et géodésiques conventionnelles. L'apprentissage automatique appliqué aux données du sismomètre citoyen le plus proche du choc principal a permis de prévoir l'évolution temporelle des répliques. Cette étude montre l'utilité de la science citoyenne contribuant à la compréhension d'un tremblement de terre majeur.

#### Référence

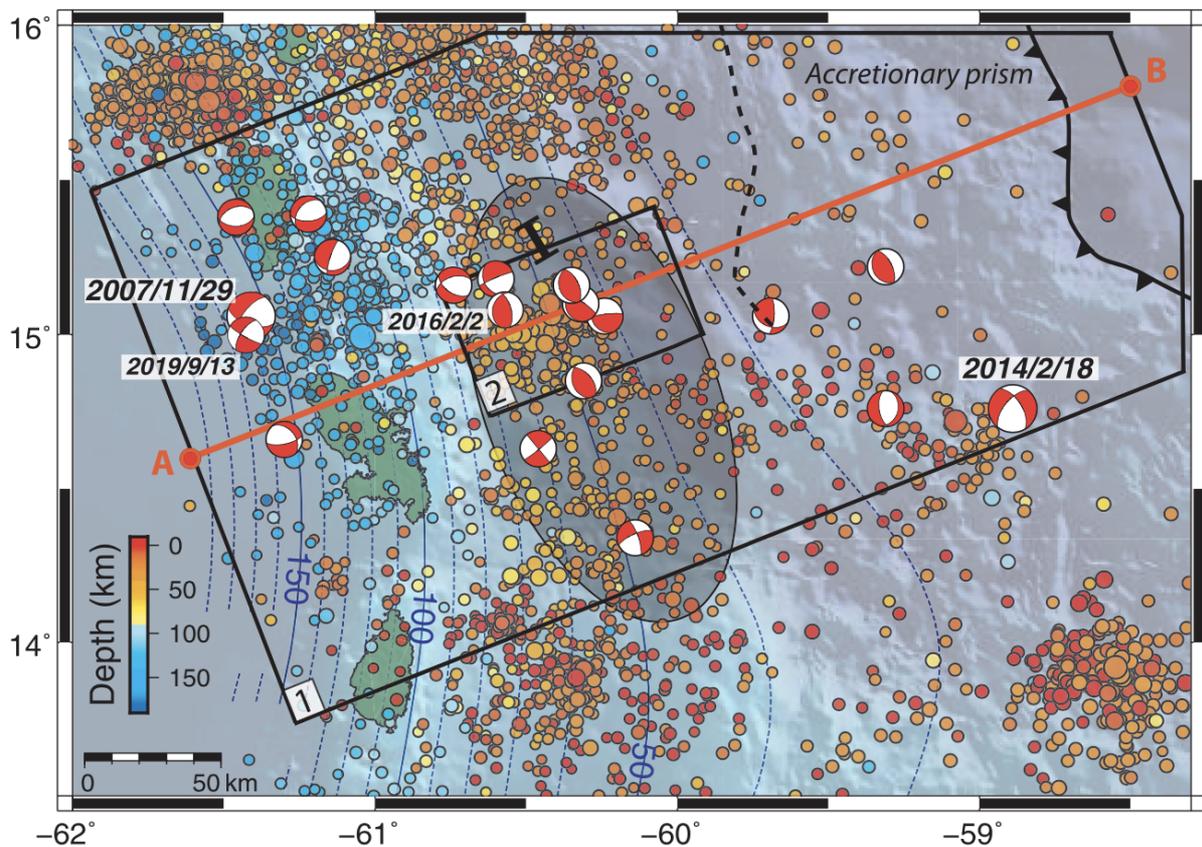
Calais, E. *et al.* Citizen seismology helps decipher the 2021 Haiti earthquake, soumis à *Science*, 2021.

### WP4 Études des Petites Antilles

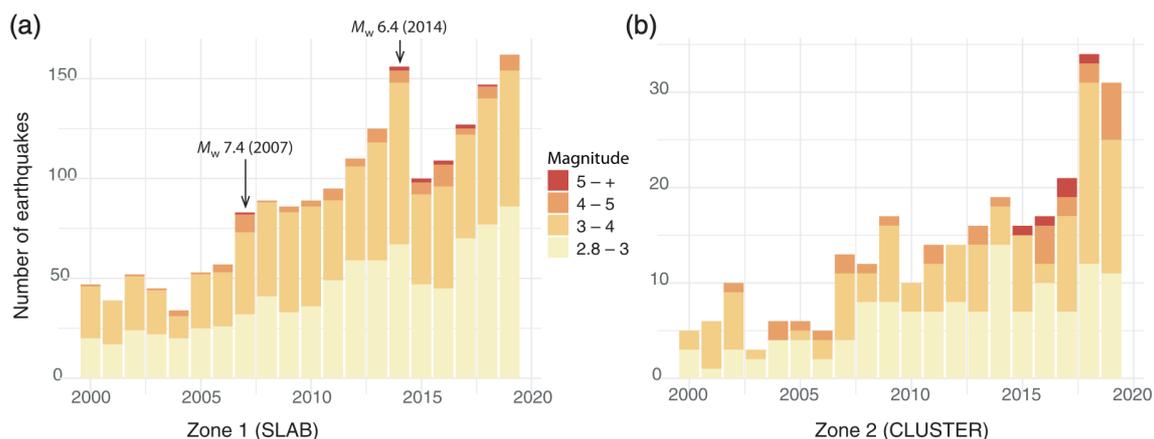
#### **Une augmentation significative de la sismicité près des tremblements de terre historiques majeurs au large de la Martinique (FWI)**

Comprendre les processus qui peuvent être à l'origine de tremblements de terre majeurs dans les zones de subduction est très difficile, en particulier dans le cas de zones à convergence lente telles que la zone de subduction des Petites Antilles. Notre étude révèle une

augmentation enregistrée du taux de sismicité et du moment sismique cumulé au cours des deux dernières décennies au large de la Martinique et, en particulier, dans la zone de rupture présumée du tremblement de terre historique majeur de 1839 (**Figures 44 et 45**). Cette sismicité soutenue est partagée entre une activité importante de profondeur intermédiaire depuis le séisme de 2007 de magnitude 7.4 qui s’est produit à environ 20 km au nord de la Martinique et un groupe de séismes associé à un processus en compression situé dans la zone sismogène de la zone de subduction. Nous observons également une migration vers le bas de la sismicité le long de l’interface de la plaque jusqu’à une profondeur de 60 à 65 km et une augmentation enregistrée de la magnitude des tremblements de terre. Toutes ces observations pourraient indiquer des changements continus le long de l’interface des limites de plaques près de la zone de la rupture majeure du séisme historique de 1839. Cependant, des études statistiques plus détaillées et des données supplémentaires sont nécessaires pour confirmer cette tendance.



**Figure 44.** Carte de sismicité de la partie centrale des Petites Antilles montrant la localisation des séismes de magnitude  $M > 2.8$  qui se sont produits au cours de la période 2000-2019. Les données de localisation proviennent du centre de données de l’Institut de Physique du Globe de Paris (IPGP). Figure de Corbeau et al. (2021).



**Figure 45.** Les histogrammes du nombre de séismes de magnitude  $M > 2.8$  enregistrés chaque année pour les deux zones étudiées nommées (a) zone 1 (plaque) et (b) zone 2 (groupe de séismes) de la figure précédente. Les couleurs des barres représentent les magnitudes. Figure de Corbeau et al. (2021).

#### Référence

**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>.

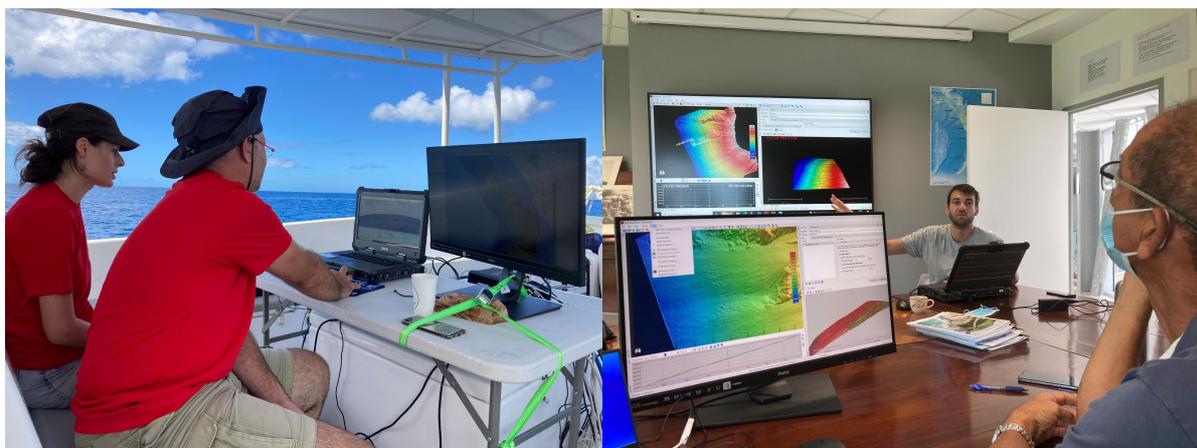
### WP5 : Plateforme Marine

L'OVSM-IPGP a fait l'acquisition au premier semestre 2021 d'une plateforme marine pour réaliser des cartographies marines en trois dimensions à haute résolution. Cette plateforme est composée d'un sondeur multifaisceaux Teledyne Reson T50 associé à une centrale d'attitude et de positionnement SBG Apogée (**Figure 46**). Ce couple permet d'obtenir des résultats de cartographie 3D de haute définition, avec une précision et une résolution d'ordre centimétrique. Ce matériel a la capacité de mesurer la profondeur des fonds marins jusqu'à 300 m de profondeur, de plus son ouverture angulaire de  $150^\circ$  permet une excellente couverture notamment dans le petit fond afin de diminuer les temps de levés en mer. Ces mesures vont permettre de suivre les phénomènes de lahars (coulées de boues torrentielles) dans la commune du Prêcheur, en estimant par exemple les apports de volumes de sédiments entre l'amont et l'aval de la rivière, mais également de continuer d'améliorer la connaissance de l'activité tectonique locale.

Durant une semaine, du 22 au 26 novembre 2021, des membres de l'équipe de l'OVSM associée au Parc Naturel Marin de Martinique (PNMM) ainsi qu'à deux archéologues de l'université des Antilles ont mis en œuvre et reçu une formation à l'utilisation du sondeur multifaisceaux. Cette semaine a permis de démontrer le fonctionnement du système, de la mobilisation du matériel au post traitement en passant par l'acquisition des données (**Figure 47**). La mutualisation de la plateforme marine pour les différents instituts de recherche des Antilles fait pleinement partie du projet PREST. La mise en place de partenariat entre les acteurs publics locaux permettra à terme une utilisation plus régulière et plus aisée de ce sondeur de haute technologie afin d'améliorer la connaissance de l'environnement marin et géologique de l'archipel Antillais. Une campagne de mesure bathymétrique a d'ores et déjà été effectuée autour de la Montagne Pelée au cours du mois de janvier 2022.



**Figure 46.** Vue des différents instruments qui composent la plateforme marine de PREST (J. Koziol).



**Figure 47.** Mise en œuvre du sondeur multifaisceaux en conditions réelles (à gauche) et formation au post traitement des données à l'OVSM (à droite) (J. Koziol).

## WP6 : Fabrication de sismomètres de fond de mer : Ocean Bottom Seismometers (OBS)

La finalisation de la conception assistée par ordinateur de la mécanique de l'OBS (ocean bottom seismometers) formée de 2 hémisphères en verre (**Figure 48**).

Des commandes pour les équipements du prototype du sismomètre de fond de mer ont été effectuées.

Une formation en ligne Altium a aussi été suivie par Kevin Canjamale.



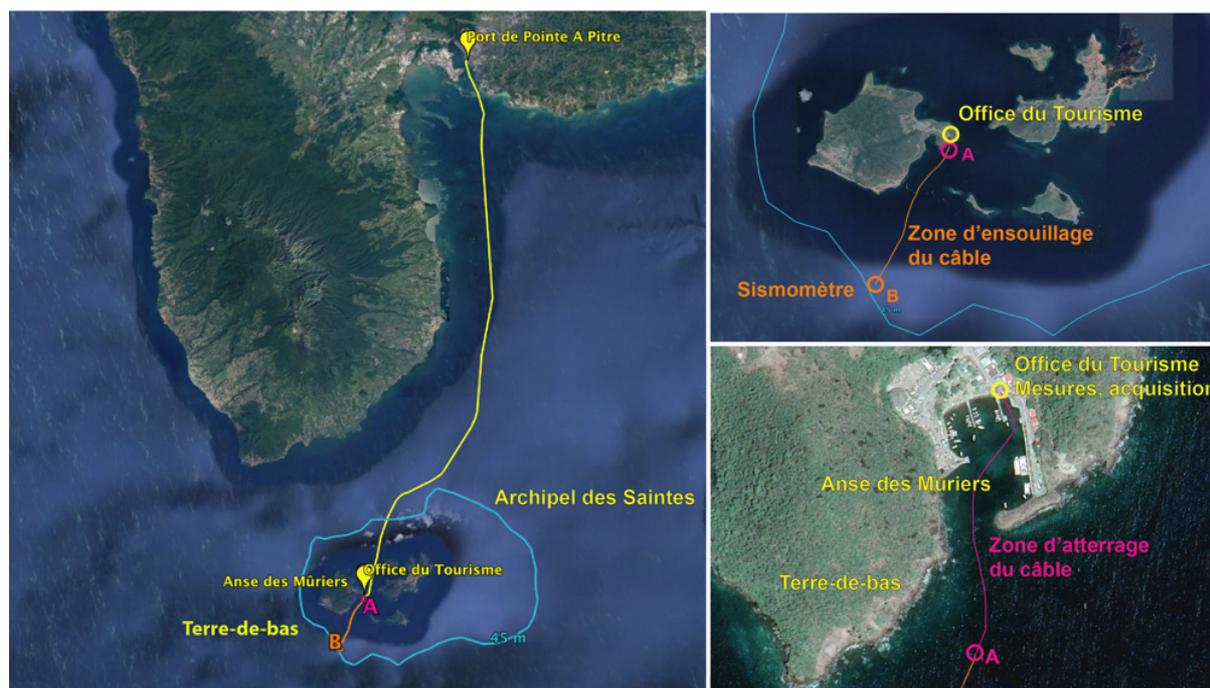
**Figure 48.** Développement d'un sismomètre de fond de mer.

#### WP7 : Observatoire sous-marin de capteurs optiques des Saintes (Guadeloupe)

La majorité des sources sismiques importantes (et donc aussi des tsunamis) menaçant les îles de la Caraïbe est située en mer. Aussi, il est indispensable de développer des techniques permettant l'installation de réseaux de capteurs géophysiques sous-marins afin d'étudier ces aléas au plus près (séismes, volcans, glissements de terrains, tsunamis...).

Dans le cadre du projet PREST (Interreg V Caraïbe) piloté par l'Observatoire volcanologique et sismologique de Martinique de l'Institut de physique du globe de Paris (OVSM-IPGP), une campagne océanographique exceptionnelle a démarré le mardi 1<sup>er</sup> juin 2021. C'est l'aboutissement de plusieurs années de recherche et développement sur les capteurs optiques en bout de fibre, réalisés par l'IPGP, l'ESEO et l'ENS, en vue de surveiller au plus près la sismicité de la zone des Saintes, touchée par le séisme de 2004, et toujours affectée par des tremblements de terre.

Conçue et développée sous la direction de Pascal BERNARD, physicien à l'IPGP et responsable de cet axe dans PREST (WP7) et Guy PLANTIER, directeur de la recherche de l'ESEO et membre de l'Université du Mans, cette instrumentation innovante permet de s'affranchir de nombreux problèmes liés au déploiement habituel d'électronique et d'énergie en fond de mer (comme les sismomètres sous-marins classiques appelés OBS). Ici, un sismomètre, un inclinomètre et un pressiomètre purement mécaniques, posés à 40 m de profondeur sous l'eau et situé à 4-5 km au sud des Saintes (**Figure 49**) sont reliés par un câble optique à Terre-de-Bas (office du tourisme) où un interrogateur laser permet à distance de mesurer ses mouvements avec une grande précision. Le prototype de sismomètre a été testé et validé en 2019-2020 au large de Brest et c'est la première fois qu'il a été installé dans des conditions réelles de surveillance puisque les données sont transmises en temps réel aux observatoires volcanologiques et sismologiques de Guadeloupe et de Martinique (OVSG-OVSM-IPGP).



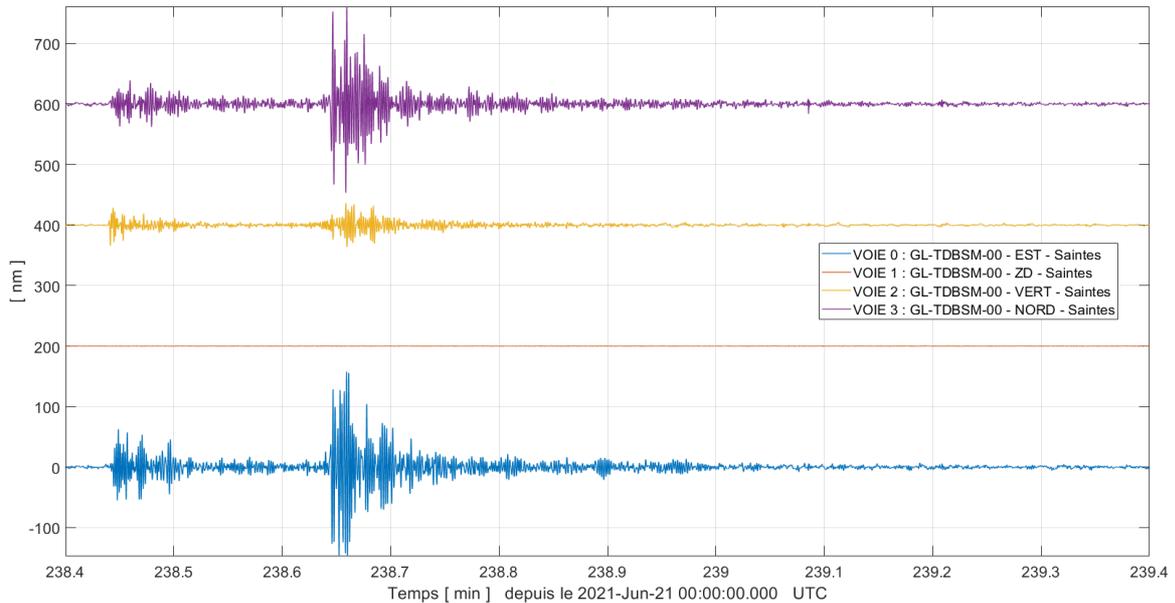
**Figure 49.** Cartes d'implantation de l'observatoire sous-marin des Saintes.

En outre, la fibre elle-même permet de suivre la propagation des ondes sismiques en tout point de son parcours, grâce à un autre interrogateur optique placé à terre par l'équipe de Géoazur. Cette approche novatrice est rendue possible par le suivi des perturbations du signal lumineux liées au passage des ondes sismiques. Ainsi, avec un point de mesure tous les 10 mètres sur la longueur du câble, la fibre optique représente l'équivalent de 500 sismomètres. L'interrogateur est un développement de la PME Febus Optics.

**En enregistrant un premier séisme le dimanche 20 juin 2021, deux jours après la finalisation de son installation, le nouvel observatoire sous-marin à mesures optiques a rapidement démontré son utilité !**

Ce premier enregistrement (**Figure 50**) signe le succès de plusieurs années de recherche et de développement sur les capteurs optiques en bout de fibre, réalisés par l'IPGP, l'ESEO et l'ENS dans le cadre du projet Interreg PREST, en vue de surveiller au plus près la sismicité de la zone des Saintes, touchée en 2004 par un séisme de magnitude 6.3, le plus important qui ait touché les Antilles françaises depuis des décennies, et dont la persistance de l'activité est encore discutée.

GL-TDBSM-00 - LOKI-PREST-02 - Mesures sur 1 ZD et 3 GHIP par sismomètre optique en sous-marin aux Saintes  
 Diode Laser  $\lambda_0 = 1310.0$  nm dans un boîtier étanche dans la THERMOS dans la valise LOKI dans le local sur le port des Saintes - Fm1 = 2000.0 Hz  
 Fichiers 2021-Jun-20 13:31:35.369 UTC à 2021-Jun-21 04:32:42.569 UTC



**Figure 50.** Premier tremblement de terre régional (Guadeloupe) détecté par le sismomètre optique sous-marin et mesuré à terre par l’interrogateur laser Loki, développés par l’ESEO dans le cadre du projet Interreg PREST.

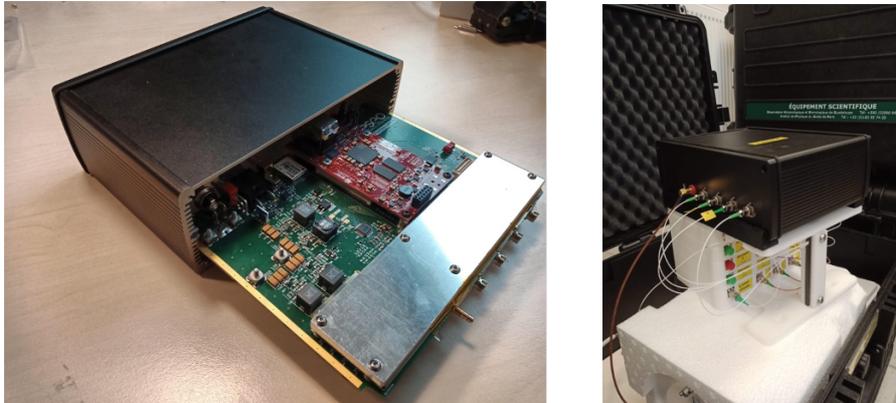
Installée pour la première fois dans des conditions réelles de surveillance (**Figure 51**), cette station sismologique innovante (**Figures 52 et 53**) permet de s’affranchir de nombreux problèmes liés au déploiement habituel d’électronique et d’énergie en fond de mer. Le sismomètre purement mécanique est posé à 40 m de profondeur sous l’eau et relié à la terre par un câble optique de 5 km au bout duquel, à terre, un interrogateur laser permet de mesurer à distance son mouvement avec une grande précision. Les données sont désormais transmises en temps réel à l’observatoire volcanologique et sismologique de Guadeloupe de l’IPGP.



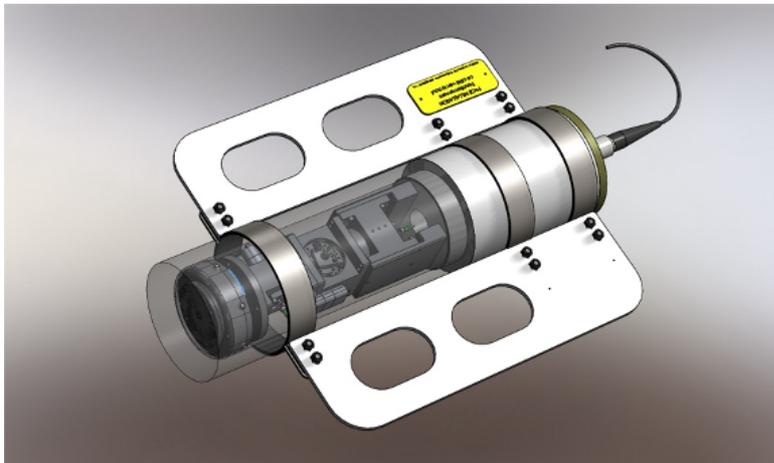
**Figure 51.** Mise à l’eau des touques de l’observatoire sous-marin des Saintes (Guadeloupe) depuis le navire océanographique Antea, avec au second plan les plongeurs dans le zodiac en charge de leur installation.

## RAPPORT ANNUEL OVSM - IPGP – 2021

En outre, grâce à une approche novatrice de suivi des perturbations du signal lumineux liées au passage des ondes sismiques, la fibre elle-même sert de réseau de capteurs (soit l'équivalent de 500 sismomètres !). Cette méthode DAS (Distributed Acoustic Sensing) a été mise en place dans le cadre d'une collaboration PREST-Géoazur.



**Figure 52.** Ensemble interrogateur dans sa valise de déploiement, avec de haut en bas, l'électronique, le conditionnement optique et la diode laser. À droite : électronique de conditionnement et de traitement.



**Figure 53.** Intégration du sismomètre optique dans son enceinte.

## Publications liées au projet PREST

Calais, E. *et al.* Citizen seismology helps decipher the 2021 Haiti earthquake, soumis à *Science*, 2021.

**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>.

Llopart, J., Lafuerza, S., Le Friant, A., Urgeles, R., Watremez, L. Long range deformation of submarine volcanoclastic sediments: coupling of hydrogeology and debris avalanche emplacement in the W off Martinique Island. *Basin Res.* 2021;00:1–23. <https://doi.org/10.1111/bre.12553>

Michaud-Dubuy, A., Carazzo, G. & Kaminski, E. Volcanic hazard assessment for tephra fallout in Martinique. 1–20 (2021). doi:10.1186/s13617-021-00106-7

Oral E., Satriano C., Future magnitude 7.5 earthquake offshore Martinique: spotlight on the main source features controlling ground motion prediction, *Geophysical Journal International*, Volume 227, Issue 2, November 2021, p1076–1093, <https://doi.org/10.1093/gji/ggab245>

Philibosian, B. *et al.*, 20th-century strain accumulation on the Lesser Antilles megathrust based on coral microatolls, soumis à *Earth Planet. Sci. Lett.* 579, 117343 (2021).

Retailleau L., Saurel J.M., Zhu W. *et al.*, PhaseWorm: A machine-learning-based realtime seismicity monitoring algorithm for volcano-tectonic monitoring, soumis à *The Seismic Record*, 2021.

## Mission à l'OVSM liée au projet PREST

Mission à l'OVSM du 1<sup>er</sup> au 21 mai 2021 de G. Carazzo et A. Michaud-Dubuy : installation des logiciels et des scénarios volcaniques et données de vents ERA5 ; collecte d'échantillons volcaniques sur le terrain).

Lors de l'éruption de la Soufrière de Saint Vincent : modélisation de la dispersion de cendres, fabrication de collecteurs de cendres et collecte de cendres.

## Conférences et Communications liées au projet PREST

- ❖ Conférence dans le cadre des séminaires de l'IPGP sur la thématique des risques naturels, F.R. Fontaine, janvier 2021.
- ❖ Conférence de F.R. Fontaine au CESECEM, Nouvelles observations sismologiques associées à l'activité récente de la montagne Pelée, janvier 2021.
- ❖ Conférence de R. Moretti, *CARICOM/Regional Action on Disaster Risk Reduction and Management, Univ. West Indies*, 3 Mars 2021.
- ❖ Conférence de F.R. Fontaine, *CARICOM/Regional Action on Disaster Risk Reduction and Management, Univ. West Indies*, 3 Mars 2021.
- ❖ Conférence de F.R. Fontaine au CDST de Saint Pierre (Martinique), Nouvelles observations géologiques associées à l'activité récente de la Montagne Pelée, 9 juillet 2021.
- ❖ Conférence de F.R. Fontaine dans le cadre des conférences de l'association LAVE, Nouvelles observations sismologiques associées à l'activité récente de la montagne Pelée, 9 juin 2021.

## Quelques résultats marquants liés au projet PREST

- ❖ Un premier séisme a été enregistré le dimanche 20 juin 2021, deux jours après la finalisation de l'installation du nouvel observatoire sous-marin à mesures optiques.
- ❖ Un article scientifique a été soumis à *Science* sur le séisme majeur d'août 2021 à Haïti.
- ❖ L'OVSM-IPGP a fait l'acquisition au premier semestre 2021 d'un sondeur multifaisceaux associé à une centrale d'attitude et de positionnement dans le cadre de la plateforme marine de PREST afin de réaliser des cartographies marines en trois dimensions à haute résolution. Une formation de membres de l'OVSM et une première utilisation du sondeur multifaisceaux ont été effectuées.

## Bibliographie

- 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.
- Fontaine, F. R.**, Roult, G., Michon, L., Barruol, G., and Di Muro, A., 2014, The 2007 eruptions and caldera collapse of the Piton de la Fournaise volcano (La Réunion Island) from tilt analysis at a single very broadband seismic station, *Geophysical Research Letters*, 41, 2803-2811, doi : 10.1002/2014GL059691.
- Fontaine, F.R.**, 2021, Prédire l'effondrement des cratères volcaniques, *Pour la Science*, n°519, janvier 2021, p54-62.
- Gadalia, A.**, Baltassat, J. M., Bouchot, V., Caritg, S., Coppo, N., Gal, F., and Zammit, C., 2014, Compléments d'exploration géothermique en Martinique: conclusions et recommandations pour les zones de la Montagne Pelée, des Anses d'Arlet, des Pitons du Carbet et du Lamentin, 2014. *Rapport final BRGM/RP-FR*, 227.
- 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.
- Hotovec-Ellis, A.J.**, and Jeffries, C., 2016. Near Real-time Detection, Clustering, and Analysis of Repeating Earthquakes: Application to Mount St. Helens and Redoubt Volcanoes – Invited, presented at Seismological Society of America Annual Meeting, Reno, Nevada, 20 Apr.
- Michaud-Dubuy, A.**, Carazzo, G. & Kaminski, E. Volcanic hazard assessment for tephra fallout in Martinique. 1–20 (2021). doi:10.1186/s13617-021-00106-7
- Retailleau L.**, J.-M. Saurel, W. Zhu, C. Satriano, G. C. Beroza, S. Issartel, P. Boissier, OVPF Team, **OVSM Team**; A Wrapper to Use a Machine-Learning-Based Algorithm for Earthquake Monitoring. *Seismological Research Letters* 2022; doi:10.1785/0220210279.
- 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.
- Yamada, M.**, H. Kumagai, Y. Matsushi, and T. Matsuzawa, 2013, Dynamic landslide processes revealed by broadband seismic records, *Geophys. Res. Lett.*, 40, 2998-3002, doi:10.1002/grl.50437.