



Conseil Départemental de la
Guadeloupe



INSU
Institut national des sciences de l'Univers

Observatoire Volcanologique et Sismologique de Guadeloupe



La Soufrière de Guadeloupe 2021-10-16 21:48 © IPGP-OVSG

Observatoires Volcanologiques et Sismologiques
Institut de Physique du Globe de Paris
Institut National des Sciences de l'Univers
Conseil Départemental de la Guadeloupe

Rapport d'activité
Synthèse Année 2020

Sommaire

Résumé.....	6
Introduction.....	8
1. Activité volcanique et sismique.....	9
1.1 Soufrière de Guadeloupe.....	9
1.2 Activité sismique régionale.....	25
1.3 Volcanisme de l'arc des Petites Antilles.....	30
2. Réseaux de surveillance.....	32
2.1 Réseaux sismologiques.....	33
2.2 Réseaux de déformations (Géodésie).....	40
2.3 Réseaux géochimiques.....	51
2.4 Réseaux érosion.....	60
2.5 Réseaux thermiques.....	68
2.6 Réseaux météorologiques.....	73
2.7 Acquisition, traitements et archivages des données sismologiques.....	75
2.8 Acquisition, traitement et alerte GNSS (Global Navigation Satellite System).....	78
2.9 Les laboratoires de chimie des eaux et des gaz.....	80
2.10 Systèmes de supervision automatisée.....	81
2.11 L'infrastructure informatique.....	82
2.12 Système WebObs pour la recherche et la surveillance scientifique.....	84
3. Activités de recherche et développement instrumental.....	86
3.1 Projets de recherche.....	86
3.1.1 ObsErA et ses activités.....	87
3.1.2 Projet ANR « DIAPHANE » et son évolution.....	88
3.4 Projet AO IPGP « Depth to surface propagation of fluid-related anomalies at La Soufrière de Guadeloupe volcano (FWI) : timing and implications for volcanic unrest ».....	90
3.5 Projet INSU-IPGP « Suivi sismologique dense du système hydrothermal de la Soufrière de Guadeloupe ».....	92
3.6 Développement instrumentaux.....	94
4. Activités d'enseignement et de formation.....	101
4.1 Activités pédagogiques.....	101
4.2 Interventions dans les médias.....	101
4.3 Visites officielles – Comités.....	101
4.4 Missions et stages.....	102
4.5 Thèses encadrées par les chercheurs OVSG-IPGP.....	103
4.6 Publications – Congrès 2020.....	104
5. Collaborations, information et prévention.....	108
5.1 Collaborations locales.....	108
5.2 Collaborations nationales.....	108
5.3 Collaborations régionales et internationales.....	108
5.4 Information grand public et prévention.....	109
6. Conclusions et perspectives.....	110

Observatoire Volcanologique et Sismologique de Guadeloupe

✉ *Observatoire Volcanologique et Sismologique de Guadeloupe
Le Houëlmont, 97113 Gourbeyre, Guadeloupe, F.W.I.*

☎ +590 (0) 590 99 11 33

📄 +590 (0) 590 99 11 34

@ info@ovsg.univ-ag.fr

http:// www.ipgp.fr/ovsg

Couverture

La Soufrière : *Incrustations de soufre élémentaire en forme d'aiguille dans une fracture près de la fumerolle Napoléon Nord au sommet de la Soufrière*

Citation de ce rapport

Rapport annuel d'activité de l'Observatoire Volcanologique et Sismologique de Guadeloupe – synthèse 2020, *Institut de Physique du Globe de Paris, décembre 2020*

Remerciements

L'Observatoire et l'IPGP tiennent à remercier en premier lieu le Département de la Guadeloupe, la Région Guadeloupe et le Service Interministériel Départemental de la Protection Civile (Préfecture de Région Guadeloupe) pour leur soutien financier et/ou logistique. Nous remercions le DRRT et la Région Guadeloupe pour l'intérêt qu'ils portent à nos actions et pour le soutien financier dont nous bénéficions (Région Guadeloupe et Europe) pour la modernisation de nos réseaux de surveillance.

Nous remercions également tous les collègues, missionnaires et stagiaires qui ont passé - malgré les difficultés sanitaires de cette dernière année - de quelques jours à quelques mois à l'observatoire, et qui au détour de leurs études spécifiques nous ont aidé de près ou de loin dans nos missions de surveillance.

Merci au directeur du Parc National de Guadeloupe et aux agents du secteur Soufrière pour leur collaboration et aide régulière sur le terrain, et tout spécialement à Patrice Segrétier.

Personnel OVSG et associé (année 2020)

Roberto MORETTI	Directeur et responsable scientifique ; Chercheur – Géochimie
Séverine MOUNE	Directrice adjointe / Chercheuse – Géochimie
Sébastien DEROUSSI	Directeur technique / Responsable du réseau géodésique
Sophie KUBASIAK	Secrétaire et gestionnaire
Magali BONIFACIE	Chercheuse – Géochimie
David JESSOP	Chercheur – Volcanologie Physique
Céline DESSERT	Chercheuse – Géochimie / OBSERA
Alexis BOSSON	Informatique (CDSA)
Tristan DIDIER	Responsable du réseau régional VSAT
Thierry-Gaëtan KITOU	Responsable du réseau sismologique de la Soufrière / OBSERA
Vincent ROBERT	Physico-chimie des fluides / Correspondant de Prévention Hygiène et Santé / OBSERA
Robin DUMEIGE (<i>jusqu'à 10/2020</i>)	Informatique pour la géodesie / déformations temps réel
Christian LAMBERT	Logistique / Maintenance des réseaux
Joanny PIERRE	Catalogue sismologique / flux de chaleur et dégazage du sol
Arnaud GARCIA (<i>jusqu'à 6/2020</i>)	Chimie
Christian MOANDA	Gardien (Conseil Départemental)

Équipes IPGP à Paris

Direction et administration	Marc CHAUSSIDON, Anne LEFRIANT, Arnaud LEMARCHAND, Jean-Christophe KOMOROWSKI, Jean-Marie SAUREL, Antoine CHARLOT
Équipe scientifique	Pierre AGRINIER, Patrick ALLARD, Cyril AUBAUT, François BEAUDUCEL, Marc BENEDETTI, Pascal BERNARD, Pascale BESSON, Georges BOUDON, Marie-Paule BOUIN, Jean-Bernard de CHABALIER, Michel DIAMENT, Jérôme GAILLARDET, Alexandre GELABERT, Jean-Christophe KOMOROWSKI, Éric LAJEUNESSE, Remy LOSNO, JEAN-PHILIPPE METAXIAN, Alex NERCESSIAN, Aline PELTIER, Martin VALLÉE, NATHALIE FEUILLET, Geneviève ROULT, Marina ROSAS-CARBAJAL, Claudio SATRIANO, Pascal Bernard, Sylvie VERGNIOLE ; ABIGAIL METCALFE ; ALEXIS FALCIN , ETIENNE LEGLAS, CHAGNON GLYNN
Équipe technique	El-Madani AISSAOUI, PIERRE BURKEL, Costanza PARDO, Laure CORDIER, Caroline GORGE, Angela LIMARE, Jean-Marie SAUREL, FELIX LÉGER

Équipe IPGP en Martinique

Équipe scientifique	Jordan CORBEAU, ANNE-MARIE LEJEUNE, FABRICE FONTAINE
Équipe technique	Jean-Gilles GABRIEL, Frédéric JADELUS, Myrtha JEAN-BAPTISTE, Benoit Zimmermann, David MÉLÉZAN, Cyril VIDAL, Jean-Marc LAVENAIRE, Tanguy MAURY

Collaborateurs scientifiques

UAG Pointe-à-Pitre	Marie-Lise BERNARD, Olivier GROS, Jean-Frédéric LEBRUN, Jack MOLINIÉ, Dominique MONTI, Mélody PHILIPPON, Alain ROUSTEAU, Mikael VAILITINGOM, Narcisse ZAHIBO
ISTERRE Grenoble et Chambéry	Florent BRENGUIER, Olivier COUTANT, Jacques GRANGEON, Mickael LANGLAIS, Jean VANDEMEULEBROUCK, PHILIPPE LESAGE
UNIVERSITÉ de Caen	Daniel AMORESE
UNIVERSITÉ de Clermont-Ferrand – OPGC	Philippe LABAZUY, FRANK DONNADIEU, LYDIE GAILLER
UNIVERSITÉ de Rennes	Dominique GIBERT, Bruno KERGOSIEN, Florence NICOLLIN, YVES LE GONIDEC CAMILLE BOUCHEZ, OOLIVIER BOUR, TANGUY LE BORGNE
UNIVERSITÉ de Bretagne Occidentale	Christophe DELACOURT
UNIVERSITÉ de Lyon	Jean-Christophe IANIGRO, Jaques MARTEAU
ENS Lyon	Pascal ALLEMAND, Philippe GRANGEAN
UNIVERSITÉ Paris Sud	Pierre LAHITTE, Xavier QUIDELLEUR
UNIVERSITÉ DE STRASBOURG	MIKE HEAP
UNIVERSITÉ DE MONTPELLIER	FRÉDÉRIC LEONE
BRGM Guadeloupe	YWENN DE LA TOREE, Yoann LEGENDRE
OFFICE DE L'EAU DE GUADELOUPE	LAURE DCUREUX
ISTITUTO NAZIONALE DI GEOFISICA E VULCANOLOGIA (I)	TOMASI ESPOSTI ONGARO, Giancarlo TAMBURELLO
MONTERRAT VOLCANIO OBSERVATORY	THOMAS C. CHRISTOPHER
UNIVERSITÉ DE FRANCFORT (D)	JENS FIEBIG
KNMI (NL)	REINOUW SLEEMAN

Résumé

Après l'année 2018, qui a marqué un changement - de régime même si dans la continuité des observations faites depuis 1992 - et l'année 2019, qui a été caractérisé par une relative stabilité, l'activité de la Soufrière enregistrée en 2020 poursuit sur ce dernier niveau stable. Vu les événements de l'année précédente et la naturelle évolution du volcan, ce niveau implique toutefois une la forte activité du système hydrothermal, à savoir de la circulation et de l'interaction des gaz chauds et de la vapeur sous pression dans la roche poreuse et fracturée.

L'activité sismique d'origine volcanique est caractérisé principalement de micro-séismes de faible énergie localisés à quelques centaines de mètres sous le dôme qui témoignent du vigueur et de la vivacité de la circulation hydrothermales dans et sous le dôme. Par conséquent, le 2020 a montré une activité cohérente à celle enregistrée depuis août 2018 et marquée par une succession d'essaims de microséismes. Les microséismes sont localisés entre 0.1 et 2.5 km de profondeur sous le dôme de la Soufrière. Au même temps, une activité sismique plus profonde, entre 2 et 4 km de profondeur sous le dôme dans un rayon de 3 km autour du sommet de la Soufrière produit des séismes souvent alignés sur des structures tectoniques régionales NO-SE qui traversent le massif volcanique. Ces structures ont été actives pendant les épisodes du 2018, mais bien moins en 2019 et 2020.

Les mesures géophysiques et géochimiques faites par l'OVSG-IPGP indiquent que le niveau de sismicité volcanique est associé à l'injections de fluides magmatiques d'origine profonde qui en 2018 a provoqué (au moins) une importante phase transitoire de surpression et de surchauffe à la base du système hydrothermal. La partie plus dynamique et typiquement intéressée par la sismicité est localisé entre 0,5 et 1,5 km sous le sommet. La surpression des fluides hydrothermaux est à l'origine de la microsismicité volcanique distribué en essaim sur le massif de la Soufrière par un processus de type « hydrofracturation ». Cette surpression est aussi responsable de la composante radiale de la déformation observée au sommet, ainsi que des vecteurs de déplacement horizontal du flanc sud-ouest du volcan qui indiquent un étalement gravitaire basal, favorisé par la réduction du coefficient de friction et l'augmentation de la pression de pore le long de zones mécaniquement faibles dans l'édifice. A l'intérieur du système hydrothermal plus profond, la proximité des fluides aux conditions du point critique (hypothèse d'une eau pure) est susceptible potentiellement de produire une brusque décompression ou des surchauffes soudaines.

C'est depuis le 4 août 2018 que l'OVSG-IPGP enregistre des essaims sismiques de très faible énergie qui se succèdent de manière rapprochée dans le temps. En date du 31 décembre 2020, l'OVSG-IPGP a détecté 47 essaims d'activité sismique de au moins 50 séismes par jour.

On observe également une augmentation des débits fumerolliens, redevenu très fort en fin de l'année 2019 et se traduisant par une extension spatiale des zones actives. Une nouvelle zone fumerollienne est observée depuis juillet 2014 dans la zone sommitale, au nord du gouffre Napoléon. Cette zone a continué de s'étendre en 2016 et une nouvelle fumerolle, nommée cratère Napoléon Est est apparue en février 2016.

Suite à l'apparition de cette nouvelle zone fumerollienne, la ville de Saint-Claude avait produit un nouvel arrêté municipal en janvier 2015 pour élargir la zone d'interdiction d'accès du public à certaines zones du sommet de la Soufrière. En considération de l'évolution de la zone d'anomalie au sommet (avec la propagation de chaleur au sol ; la recrudescence de l'activité des fumerolles, accompagnée de l'apparition dans le temps de nouveaux centres d'émission et de projection de boue et de fragments ; les indications de l'impact au sol et sur la végétation de gaz soufrés et acides) et donc d'une général augmentation des zones d'instabilité, la Préfecture de Guadeloupe avec l'arrêté n° 2019/001 CAB SIDPC du 14 janvier 2019 a institué un accès réglementé au sommet du volcan de la Soufrière, basé sur l'identification d'un périmètre de sécurité et sur l'interdiction à toute personne non-autorisée de le franchir.

En ce qui concerne l'activité tellurique de Guadeloupe, l'année 2020 aura été marquée par l'activité sismique dans la région des Saintes et dans le nord-est de la Barbuda. L'activité des Saintes (potentiellement des répliques des séismes de magnitude 6.3 du 21 novembre 2004 et magnitude 5.8 du 14 février 2005) se poursuit à l'heure actuelle, en diminuant globalement.

En 2020, un total de 1144 séismes tectoniques a été enregistré autour de la Guadeloupe. Au moins 15 de ces séismes ont été ressentis par la population en Guadeloupe et ont fait l'objet de communiqués.

L'année 2020 aura aussi été celle d'un renforcement du réseau de mesures sismologique du volcan avec le passage d'une technologie analogique mono composante à une station numérique équipée d'instruments large bande modernes (3 composantes et numériques), et la modernisation de la station accélérométrie de Baillif. Une station d'analyse automatique des gaz fumeroliens a été ajoutée à proximité du Gouffre 56, cette station bénéficie de nouveaux dispositifs de protections des appareils au gaz qui s'avèrent efficaces sur la durée. Une routine informatique a été développée et mise en place pour traiter les données du réseau d'analyse des gaz a été mise en place. Le réseau météorologique a lui aussi été renforcé avec le passage au numérique et l'automatisation de l'acquisition des données de la station du Houëlmont.

Dans le contexte de réactivation de la soufrière et suite au séisme volcano-tectonique du 28 avril 2018, l'OVSG a bénéficié d'un support exceptionnel de la part du Ministère de la Transition Écologique et Solidaire pour renforcer les moyens de surveillance du volcan. Parmi les actions engagées, il a été décidé de mettre en place un système d'alerte SMS temps-réel basé sur les déformations du volcan. La partie informatique de ce système d'alerte est actuellement en phase de test et de paramétrages avant d'être adapté au réseau de GNSS en place sur la Soufrière de Guadeloupe. Dans le cadre de ce partenariat avec le MTES, les équipes de l'OVSG et de l'IPGP ont travaillé de concert pour lancer un appel d'offres visant la réalisation de forages destinés à faire partie de stations multi-paramètres comprenant notamment des inclinomètres à haute résolutions. Nous travaillons actuellement à une nouvelle version de cet appel d'offres qui est d'avantage ouvert vers la Martinique et la métropole ou sont basées des sociétés susceptibles de répondre favorablement aux exigences imposées par les instruments à mettre en place.

Mais l'année 2020 a été l'année de la pandémie sanitaire COVID 19, ce qui a déterminé l'annulation des plusieurs activités scientifiques. Cependant, l'observatoire a participé aux travaux scientifiques du projet Eurovolc et à son congrès scientifique à Catania (I) en sébut d 'année et a été présent, en virtuel, au Congrès European Geosciences Union de Vienne, à la Goldschmidt Conference de Barcelone, à l'American Geophysical Union de San Francisco.

Conscient de son rôle dans l'éducation préventive et la transmission du savoir aux citoyens, mais dans les limites de la modalité dégradée de travail imposée par la pandémie à nous et à tous les acteurs de la science et de l'éducation, l'observatoire a poursuivi ses actions avec les associations et renforcé sa participation dans la diffusion de la culture scientifique autour des géosciences, connaissance indispensable pour acquérir une véritable culture du risque.

Enfin, il faut rappeler que l'observation pérenne de La Soufrière de Guadeloupe débute le 21 mars 1950, avec l'achat de la propriété de Parnasse, sur le flanc du volcan. Lé 2020 a marqué donc les 70 ans de la surveillance e la Soufrière par l'OVSG-IPGP. Il est vraiment dommage que le contexte de crise sanitaire n'aie pas permis de célébrer !

Introduction

L'Observatoire Volcanologique et Sismologique de Guadeloupe (OVSG) est une petite structure polyvalente qui dépend des Observatoires Volcanologiques et Sismologiques de l'Institut de Physique du Globe de Paris (IPGP), Grand Établissement de recherche et d'enseignement supérieur dans tous les domaines des Sciences de la Terre. L'IPGP a la responsabilité de la surveillance des quatre volcans actifs français (Soufrière de Guadeloupe, Montagne Pelée en Martinique, Piton de la Fournaise à la Réunion et volcan de Mayotte) où ont été implantés trois observatoires permanents, dont celui de Guadeloupe en 1951.

Les crédits de l'observatoire de Guadeloupe proviennent aujourd'hui de l'IPGP, de l'Institut National des Sciences de l'Univers (INSU-CNRS) et du Ministère de l'Éducation Nationale. Les bâtiments, propriétés du Conseil Départemental de Guadeloupe sont mis à disposition de l'IPGP dans le cadre d'une convention de partenariat avec l'INSU et l'IPGP. Le Conseil Départemental assure aussi une subvention annuelle d'aide au fonctionnement et la mise à disposition d'un gardien. Depuis de nombreuses années la Région Guadeloupe soutient l'Observatoire sur des projets scientifiques ou des projets d'instrumentation (p.e. FEDER). Depuis 2018 le Ministère de la Transition Écologique et Solidaire en charge de la gestion des risques naturels participe aux efforts de modernisation de la surveillance par une participation ponctuelle au financement d'équipements opérationnels (p.e. convention dite « MTES-IPGP »). Enfin, le Service Interministériel Départemental de la Protection Civile (Préfecture de la Région Guadeloupe) nous apporte son soutien logistique en nous permettant l'utilisation de l'hélicoptère de la Sécurité Civile pour des transports de matériels lourds sur le volcan ou des survols de surveillance.

Les missions confiées à l'observatoire de Guadeloupe sont les suivantes :

1. Étude de l'activité volcanique de la Soufrière de Guadeloupe par le biais de l'enregistrement de séries temporelles de données géophysiques et géochimiques de qualité, complétées par des observations visuelles de la phénoménologie dans le but de :

- comprendre le fonctionnement du volcan ;
- détecter un changement de comportement et l'évaluer en terme de potentiel éruptif ;
- informer les autorités responsables de la protection des personnes et des biens.

2. Étude de la sismicité régionale (Guadeloupe et ses îles proches) liée à l'activité tectonique de l'arc des Petites Antilles par le biais de l'enregistrement continu de la sismicité, dans le but de :

- avertir les autorités des caractéristiques d'un séisme ressenti et des répliques qui peuvent y être associées ;
- établir sur des longues durées les caractéristiques spatio-temporelles de la sismicité régionale et locale pour contribuer à la zonation du risque sismique.

3. Favoriser et participer aux travaux de recherche fondamentale et appliquée en géophysique, géochimie, et géologie concernant le volcanisme, la sismologie et la tectonique régionale, y compris dans le cadre de coopérations régionales.

4. Contribuer à l'alerte aux tsunamis dans la Caraïbe par la transmission en temps réel de données sismologiques et marégraphiques aux centres d'alerte internationaux (actuellement le Pacific Tsunami Warning Center à Hawaï).

5. Contribuer à l'information préventive et à la divulgation des connaissances dans les domaines du risque volcanique et du risque sismique.

Ce rapport présente un résumé des activités de l'observatoire au cours de l'année 2016. Il complète les bulletins mensuels et synthétise les informations du site web en accès restreint, plus technique et plus détaillé, regroupant l'ensemble des données enregistrées et l'état des réseaux de surveillance.

1. Activité volcanique et sismique

Combinés à notre connaissance du contexte géodynamique et aux observations de terrain, les réseaux automatiques de l'observatoire ont permis une surveillance permanente et continue de la Soufrière de Guadeloupe (Figure 1.1) et de l'activité sismique régionale dont voici les principales caractéristiques pour l'année 2019.

1.1 Soufrière de Guadeloupe

Le complexe de la Grande Découverte-Soufrière est composé de 3 stratovolcans, Grande Découverte, Carmichaël et Soufrière, qui se sont construits durant les derniers 445 000 ans. La Soufrière est l'édifice le plus récent et son histoire a débuté il y a environ 9150 ans. Il s'agit d'un volcan actif, de type explosif, ayant connu de nombreuses éruptions magmatiques et non-magmatiques, dites « phréatiques », par le passé.

La dernière éruption magmatique majeure, qui date du XVI^e siècle (1530 ± 30 ans ; Komorowski et al., 2008) a conduit dans sa phase finale à la formation du dôme actuel. Les reconstitutions et modélisations récentes montrent qu'elle a commencé par un écroulement partiel du flanc du volcan avec une avalanche de débris qui a atteint la mer au niveau de Basse-Terre. Il a été suivi d'une explosion plinienne modérée avec une colonne de gaz et de particules solides atteignant 10-12 km d'altitude, des retombées de ponces atteignant environ 6 cm d'épaisseur à Saint-Claude, et des coulées pyroclastiques dans les vallées radiales jusqu'à des distances de 5-6 km du dôme. L'éruption s'est terminée par la construction du dôme actuel de la Soufrière associée à la mise en place de coulées pyroclastiques dans les vallées radiales.

Depuis, les éruptions qui se sont produites ont été uniquement phréatiques impliquant une décompression explosive du système hydrothermal et l'éjection de matériaux anciens du volcan sans apport de magma nouveau. Ces éruptions ont été majeures en 1797-98, 1836-37 et 1976-77 et mineures en 1690, 1809-1812, et 1956. Les phénomènes associés à l'activité non-magmatique dite phréatique incluent des explosions verticales et latéralement dirigées, des retombées de cendres et de blocs, des écoulements pyroclastiques non-magmatiques, des coulées de boue, du dégazage acide pouvant contaminer l'environnement. Les éruptions non-magmatiques majeures peuvent également engendrer des effondrements partiels de l'édifice et la mise en place d'avalanche de débris sur quelques kilomètres de distance ainsi que des explosions latérales dirigées.

Activité fumerollienne et hydrothermale

Depuis 1992 et la réactivation du Cratère Sud, l'activité fumerollienne n'a cessé d'augmenter lentement d'année en année avec en particulier l'apparition d'HCl en 1998. Après la réactivation du gouffre Tarissan en 2000, du gouffre Napoléon en 2003, du gouffre 56 en 2007, de 2 fumerolles le long des fractures Lacroix en 2011 (entre le cratère Sud et le gouffre 56), d'une zone du gouffre Breislack en 2013, une nouvelle fumerolle est apparue au sommet en juillet 2014 : la zone Napoléon Nord (Figure 1.1). **Cette zone fumerollienne a continué de s'étendre, associée à la progression d'une anomalie thermique (>50 °C au sol). En 2016 l'apparition d'une nouvelle fumerolle nommée Napoléon Est en février** (Figures 1.1 et 1.2) **marque une étape majeure de l'évolution du sommet.** La température est d'environ 95 °C, et autour de la bouche, on peut encore retrouver des signes de projections de boue à quelques mètres de distance, liées à sa formation ainsi qu'à son agrandissement.

Les émanations gazeuses aux abords et sous le vent des fumerolles principales du sommet (notamment le Cratère Sud, le Tarissan, et le Gouffre 1956) présentent, depuis 1998, des risques avérés d'irritation et de brûlures (yeux, peau, voies respiratoires).

Compte tenu de l'évolution décrite ci-dessus et des autres observations sur l'activité, l'OVSG-IPGP considère qu'il est important de garder, à titre précautionneux, une distance de au moins 50 m de rayon autour des principaux centres d'émission de gaz fumerolien (Cratère Sud Sud, Cratère Sud Central, Cratère Sud Nord, Napoléon Nord, Napoléon Est, Gouffre 1956, Gouffre Tarissan).

Le nouvel arrêté du Préfet de la Région de Guadeloupe (**arrêté n° 2019/001 CAB SIDPC du 14 janvier 2019**) instituant un accès réglementé au sommet du volcan de la Soufrière, basé sur l'identification d'un périmètre de sécurité et sur l'interdiction à toute personne non-autorisée de le franchir.

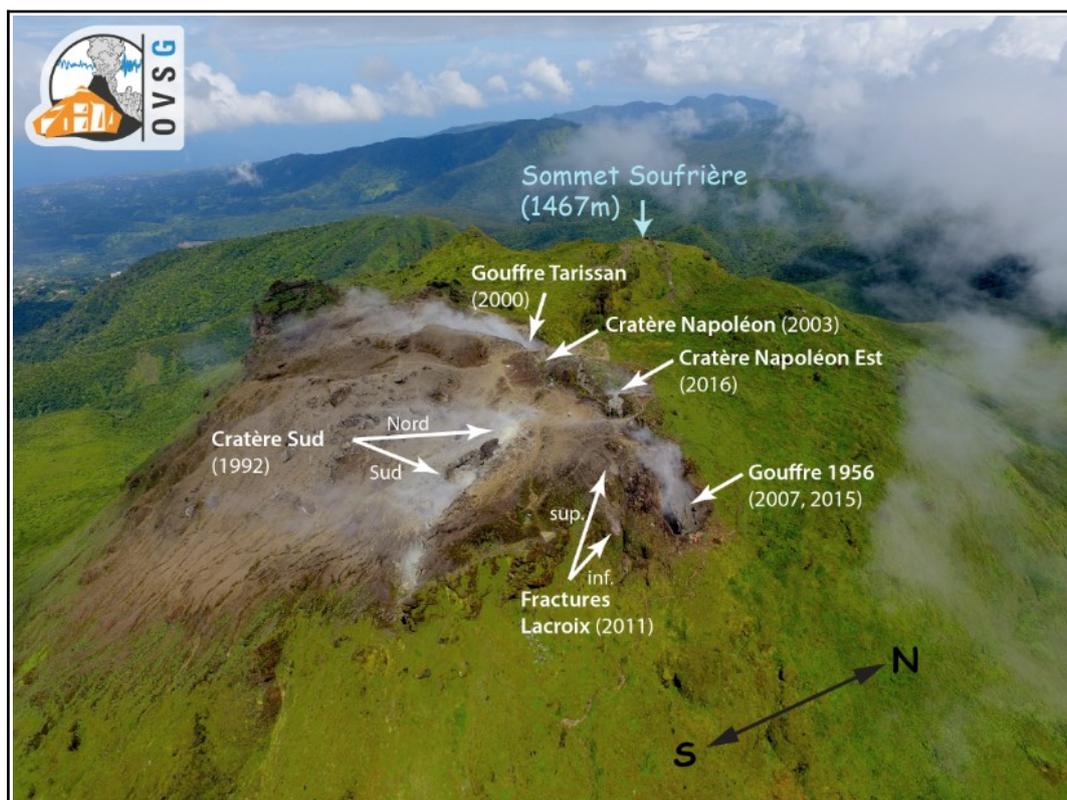


Figure 1.1. Les principaux gouffres/fractures actifs au sommet de la Soufrière (© Anglade-IPGP, 15-09-2016). La fumerolle du gouffre 1956 est apparue en 2007 et son débit s'est fortement accru depuis 2015.

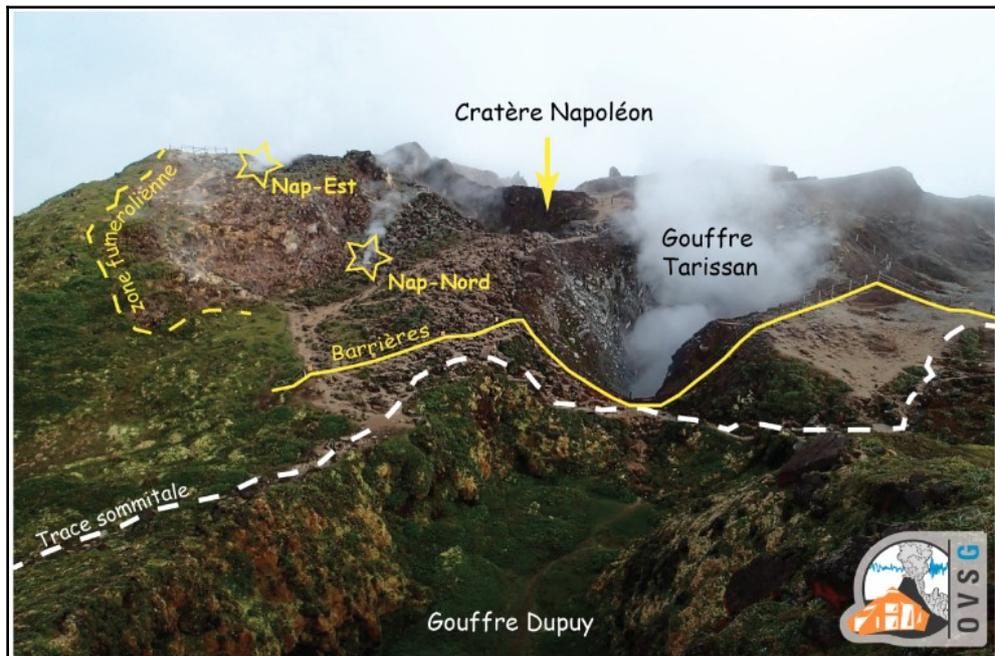


Figure 1.2. La zone fumerollienne autour du cratère Napoléon vue du sommet de la Soufrière (© OVSP-IPGP, 16-04-2016). Le dégazage est diffus dans toute la zone et les fumarolles principales (Nap-Nord et Nap-Est) sont matérialisées par des étoiles jaunes.

Cratère Sud : Depuis la crise d'avril 2018 l'activité fumerollienne et les vitesses d'émission des gaz au Cratère Sud sont restées très élevées depuis la fin de l'année 2019, avec des débits très élevés qui ont parfois empêché l'échantillonnage des gaz.

Juste avant l'essai sismique du 27-28 avril 2018 et le séisme de magnitude M4.1, une importante baisse des vitesses de sortie du gaz, et par conséquent des débits, avait caractérisé l'activité fumerollienne. A partir de septembre 2018, nous avons observé une nouvelle augmentation des débits qui ont atteint un niveau d'intensité très haut aux fumarolles du Cratère Sud (Cratère Sud Sud, CSS, Cratère Sud Central, CSC, Cratère Sud Nord, CSN) et susceptible d'augmenter encore. L'activité fumerollienne se caractérise toujours au Cratère Sud par d'importants dépôts de soufre cristallisé jaune.

La température au Cratère Sud Central a montré des fluctuations, ayant une moyenne sur base annuelle de **101.2 °C** (en ligne avec 2018-2019 et environ 5 °C supérieure aux années précédentes). La valeur maximale (107 °C) a été mesurée en Novembre 2020 et la minimale (98°C) en Janvier 2020. Il faut remarquer que cette année nous n'avons jamais mesurée la valeur de base de 95 °C (température d'équilibre liquide-vapeur pour l'eau à la pression atmosphérique du sommet).

Le pH du panache est acide en raison de la présence d'acide chlorhydrique (HCl) et d'acide sulfurique (H₂SO₄) depuis 1998. Il a varié entre 1.85 et 3.95 avec un pH moyen de **2.14**. Le panache est donc plus acide qu'en 2019 (pH moyen de 2.7) et 2018 (pH moyen de 3.3). Il s'agit d'un changement à suivre, qui dérive de la forte baisse de pH mesuré depuis Novembre (1.02) et aussi Décembre (1.33) et que nous mettons en relation de cause-effet avec un drainage hydraulique du Tarissan, et/ou du même réservoir qui alimente ceci, en faveur des fumarolles du CS. Le débit de la bouche Cratère Sud Central a toujours été suffisamment fort pour prélever des échantillons de gaz pour analyse en laboratoire, mais depuis fin 2019 il est monté en puissance pour tout le reste de l'année 2020. Le gaz est constitué principalement de **vapeur d'eau** (de **94.5 à 97.5 %**), **CO₂** (**2.0 à 4.6 %**) et **H₂S_{total}** (**0.4 à 1.2 %**).

La Figure 1.3 montre l'évolution temporelle de la composition chimique de la fumarolle CSC. Pour cette fumarolle, la plus représentative pour la surveillance et l'étude du système hydrothermal, on montre les rapports molaires gaz/vapeur d'eau, C/S, CO₂/CH₄ et CO/CO₂.

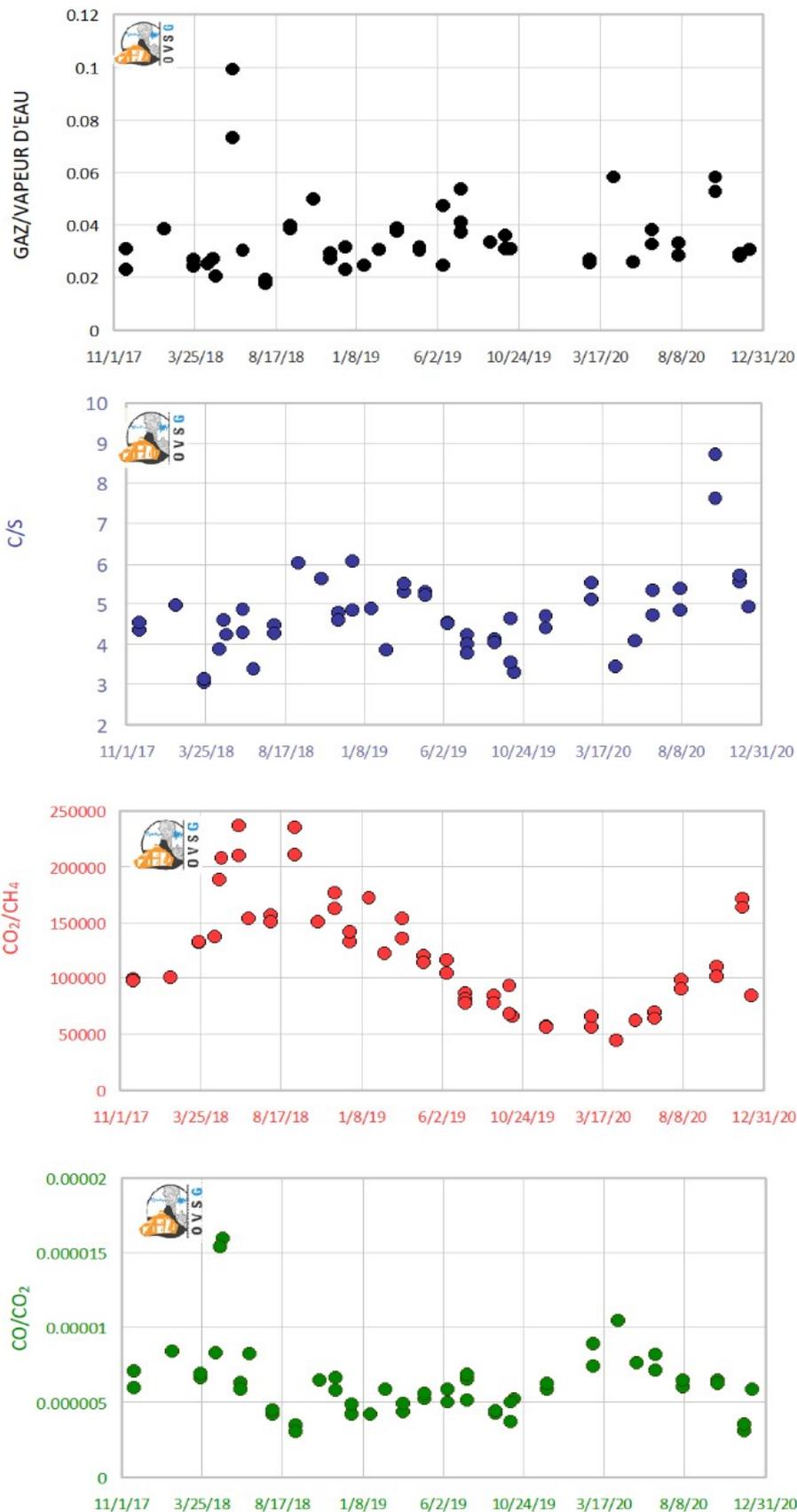


Figure 1.3. Rapports molaires de la composition chimique des gaz à la fumerolle CSC depuis novembre 2017.

La variation du rapport gaz/vapeur d'eau mesure essentiellement la variation de la proportion relative de gaz magmatique à la composante météorique (eau de pluie) dans le système hydrothermal ; ce rapport peut augmenter à cause de l'arrivée des gaz magmatiques et/ou de la condensation de la vapeur d'eau. Le rapport C/S peut augmenter lors de la remontée des gaz magmatiques profonds ou par perte de soufre, surtout H₂S (« gas scrubbing ») dans le système hydrothermal, souvent associé à une diminution de température. Une augmentation du rapport CO₂/CH₄ est considérée comme un signal clair de l'arrivée de gaz magmatiques oxydés et de haute température, donc enrichis en CO₂ et dont l'arrivée oxyde et potentiellement réchauffe la base du système hydrothermale, limitant la conversion du CO₂ en CH₄. Enfin, le rapport CO/CO₂, pour un état d'oxydation fixé au sein du système, est normalement associé au chauffage du système hydrothermal. On rappelle en outre que dans les systèmes hydrothermaux caractérisés par la coexistence de vapeur d'eau et le liquide (eau pure ou saumures), les phénomènes de chauffage et de surpression sont associés, de sorte que température et pression augmentent ensemble.

On peut remarquer que le rapport gaz/vapeur d'eau, stable depuis 11/2017, monte de manière considérable le 2 juin 2018 (jusqu'à 0.1), avant de retomber et varier, depuis fin juin 2018, entre 0.03 (valeur de Décembre 2020) et 0.06. Le rapport C/S fluctue entre des valeurs de 3 et 6, sauf pour le pic de 8 du mois d'octobre 2020. Le rapport CO₂/CH₄ a montré une tendance à l'augmentation, avec des valeurs en forte hausse à fin avril et début mai (200 000 à 250 000) qui atteignent un pic de la même valeur début juin et en septembre 2018. Le rapport a indiqué une valeur moyenne autour de 150 000 depuis octobre 2018, avec des fluctuations entre 120 000 (février et avril 2019) et 170 000 (novembre 2018 et janvier 2019). En juin 2019 il a montré des valeurs proche de 100 000, comparable à celles observées en Novembre 2017, et après est descendu pour atteindre environ 50 000 en décembre 2019 et depuis il a remonté pour atteindre 170 000 en Novembre 2020 et redescendre à environ 90 000 en Décembre 2020.

Dans l'ensemble, le comportement de ces indicateurs est lié à des fluctuations de la composante profonde « gaz magmatique » dans le système hydrothermal, avec tendance à son augmentation en juin et septembre 2018.

L'infiltration progressive des gaz profonds d'origine magmatique dans le système hydrothermal a été responsable de l'augmentation du rapport CO/CO₂ qui a atteint son maximum fin avril – début mai 2018. Ceci témoigne typiquement d'un processus de chauffage en profondeur du système hydrothermal. A partir de juin 2018, cet indicateur se repositionne sur une ligne de base identifiée depuis novembre 2017 et fluctuant de 0.000005 à 0.00001, avec un minimum (0.000003) atteint en septembre. Depuis, on assiste à des fluctuations autour d'une valeur de 0.000005, à l'exception de la hausse jusqu'à 0.00001 (Avril 2020), et la baisse à 0.000003 en novembre 2020.

L'arrivée de gaz magmatiques d'origine profonde a donc provoqué une augmentation de la température et de la pression à l'intérieur du système hydrothermal, à des profondeurs entre 2 et 3 km. Ceci est compatible avec la profondeur des séismes volcaniques des essaims sismiques enregistrés entre février et avril 2018.

Les dernières données montrent que le système volcanique de la Soufrière reste dominé par une dynamique cyclique de recharge et décharge d'énergie liée à l'infiltration de gaz magmatiques profonds dans le système hydrothermal. Ceci engendre un processus récurrent de surchauffe et de surpression des fluides hydrothermaux en ébullition dont les valeurs de pression et température approchent celles du point critique de l'eau. Ainsi, l'accumulation et la relâche énergétique a atteint, pour l'instant, son pic lors de la forte activité sismique et fumerollienne de mars-avril 2018. Compte tenu de l'infiltration marquée des gaz magmatiques dans le système hydrothermal, ainsi que des températures et pressions élevées à l'intérieur de ce dernier, nous estimons que le système volcanique est en train de se recharger et d'accumuler de l'énergie. En particulier, l'évolution récente du rapport CO/CO₂ couplé aux relativement faibles valeurs du rapport CO₂/CH₄ nous fait conclure au présent que le système hydrothermal a remonté en pression et température, mais probablement sans un nouveau apport de gaz magmatique profond qui soit (encore) visible dans l'information chimique.

Nous remarquons aussi que la tendance à l'augmentation de CO/CO₂ mesurée jusqu'à avril 2020 semble avoir suivi la diminution du taux de récurrence d'essaims sismiques observée depuis septembre-décembre 2019. Différentes hypothèses peuvent expliquer ces observations: 1) une augmentation du flux de chaleur en profondeur ou bien 2) le colmatage des fractures qui avait été ouvertes avec l'épisode de fin Avril 2018 marqué par le séisme de M 4.1.

En suite, la toute récente et vivace dynamique sismique du système hydrothermale, marquée par la reprise de ces essaims depuis août 2020, pourrait être en relation avec la fluctuation positive du rapport CO₂/CH₄. Dans ce cadre le pic de C/S observée le mois de octobre 2020 et le retour ultérieur aux valeurs pré-pic seraient donc révélatrices d'un excès de CO₂ accumulé précédemment et libérée par le système (Figure 1.3).

Les futures observations et analyses donneront les éléments pour raffiner ces hypothèses.

Cratère Napoléon : En juillet 2014, une **nouvelle zone fumerollienne** est apparue dans la partie sommitale du dôme, au nord du gouffre Napoléon (Figure 1.2). Cette activité se matérialise par de nombreuses petites zones de dégazage diffus acide qui provoque le dépérissement de la végétation et la détérioration de l'ancienne trace menant au Cratère Sud. Les températures mesurées au sol varient entre 70 °C et 95 °C. Depuis juillet 2014, l'observatoire a noté une extension de la zone et une augmentation des débits de dégazage. La fumerolle principale, nommée Cratère Napoléon Nord (Nap-Nord ; Figure 1.2), fait l'objet d'une surveillance accrue tous les mois. Sa température est restée stable en 2020, autour de **95 °C**. Son pH est acide et stable avec un pH moyen annuel de **3.1** (similaire à 2019). En 2018 on a remarqué une augmentation de son débit, mais en 2019 et 2020 il a été stable. Une nouvelle fumerolle, nommée **Cratère Napoléon Est est apparue en février 2016** (Nap-Est ; figures 1.1 et 1.2). La bouche de la fumerolle a beaucoup évolué au cours de l'année (migration, colmatage, réactivation, projection de boue ; figure 1.4) et s'est agrandie jusqu'à 2018. Traces de projection de boue très évidentes en Avril 2018 sur quelque mètres autour du centre fumerollienne témoignent d'une activité récente

Gouffre Tarissan : L'activité s'est également maintenue au niveau du gouffre Tarissan avec un débit moyen du panache tout au long de l'année. Les sondages et prélèvements du lac acide situé au fond du gouffre (fluctuant entre 99.6 et 108.5 m de profondeur) ont été poursuivis. Le niveau du lac a varié d'environ 9 m en 2020 et est en partie lié aux apports en eau de pluie. L'acidité très forte s'est maintenue avec un **pH** variant entre **-0.74 et -0.28** (pH moyen de -0.43 en 2020, en diminution par rapport au 2019 (-0.3)). Ces éléments suggèrent un drainage plus efficace du lac acide par rapport aux années précédentes.

Fracture / Gouffres Napoléon et 1956 : les fumerolles du Gouffre Napoléon présente un dégazage permanent avec une légère pression. Le Gouffre 1956 (Figure 1.1), réactivé depuis 2007, montre des forts débit, assez stables après la **significative augmentation débutée septembre 2015**.

Fractures Lacroix : Deux petites bouches fumerolliennes se sont activées à partir de décembre 2011. Elles sont localisées entre le Cratère Sud et le Gouffre 1956, dans une zone fracturée active en 1976, appelée « Fractures Lacroix ». Les débits sont constants et permanents.

Gouffre Breislack : un dégazage assez diffus (pas de bouche fumerollienne clairement visible) est observé depuis octobre 2013 au nord du gouffre Breislack, dans le prolongement de la fracture de 1956. La végétation à proximité de la zone est totalement brûlée. En fin d'année 2018 on avait pu identifier un faible flux thermique venant en profondeur de la fracture en fond du Gouffre Breislack, associé à la présence des sublimés blancs sur la paroi dans la fracture, à l'émission de CO₂ et de H₂S et à une zone sans végétation ou avec végétation en dépérissement aux abords immédiats de la paroi en bas du gouffre.e.



Figure 1.4. Evolution de la fumerolle du cratère Napoléon Est apparue en février 2016 (© OVSG-IPGP). La température était de 93 °C le 15 décembre 2016 (D. Gibert, A. Talard-Breton).

Phénoménologie : Les émanations acides et le vent maintiennent le dépérissement de la végétation sur la partie Sud du sommet et sur les flancs Sud-Ouest et Ouest du volcan. En fonction de l'activité hydrothermale et du régime des vents, différentes zones peuvent être impactées sur l'ensemble du volcan. En particulier, l'affaiblissement de vent peut favoriser une mineure dispersion et donc l'accumulation dans les gouffres, ravines ou autres zones relativement en dépression par rapport à la topographie locale, des émanations venant des réseaux des fractures au fond de ces zones.

En fin Novembre 2019, l'OVSG a effectué un survol de la Soufrière avec l'hélicoptère de la SIDPC afin de surveiller l'activité au sommet avec une caméra thermique. Le survol thermique indique la propagation d'une anomalie thermique (>50°C) au sol d'une partie du sommet qui désormais comprend une partie de l'ancienne trace entre le Gouffre Tarissan et le Gouffre 1956. Cette zone fumerollienne sommitale a continué d'évoluer depuis quelques années avec l'apparition en juillet 2014 d'une nouvelle zone active diffuse (faibles débits) au nord du Cratère Napoléon associée à l'anomalie thermique. Une nouvelle fumerolle a été identifiée au début du mois de février 2016, à l'est du Cratère Napoléon (dans la zone d'interdiction d'accès au public). Sa température est d'environ 95°C.

Autour de la bouche, on a retrouvé des anciennes signes de projections de boue à quelques mètres de distance. Le débit du Gouffre 1956 est en nette augmentation depuis septembre 2015. Ces évolutions confirment que l'augmentation de l'activité du système hydrothermal depuis 1992 est devenue plus importante dans la dernière période. Nous rappelons ici que le mois de décembre 2018 nous avons observé le dépérissement de la végétation dans deux zones de la partie supérieure de la Ravine Matylis, ainsi que la présence de sublimés blancs dans différents points dans le sol. En outre, nous avons identifié un faible flux thermique venant en profondeur de la fracture en fond du Gouffre Breislack, associé à la présence des sublimés blancs sur la paroi dans la fracture, à l'émission de CO₂ et de H₂S et à une zone sans végétation ou avec végétation en dépérissement aux abords immédiats de la paroi en bas du gouffre.

Sources thermales : Depuis quelques années, nous assistons à une progressive mais systématique augmentation de la température des sources thermales situées en altitude sur le flanc sud de la Soufrière. Depuis 1979, les Bains Jaunes (T moyenne de 30.4 °C en 2020) ont augmenté d'environ 4 °C, la source du Galion (T moyenne de 52 °C en 2020) de 9 °C. Depuis 1995, la source Pas du Roy (T moyenne de 35.5 °C en 2020) a augmenté de 4.5 °C et celle de Tarade (T moyenne de 44.8 °C en 2020) de 8 °C. D'autres sources montrent une température stable (Bains Chauds de Matouba, T moyenne de 58.5 °C en 2020 et de 2e chute du Carbet, T moyenne de 41.3 °C en 2020). Les pH sont stables depuis plusieurs années, mesurés entre 4.9 à Galion et 6.7 à la source de la 2e chute du Carbet.

Activité sismique

L'année 2020 constitue en terme de sismicité observée sur le volcan, une année de calme relative, après que le 2018 a été l'année la plus active enregistrée depuis plus de 40 ans. Cependant, nous avons eu **8615** événements identifiés au total mais une énergie totale libérée de **~28 MJ** suivant l'équation suivant la méthode de Kanamori).

Cette activité est répartie en essais de microséisme d'une durée 2 à 7 jours en moyenne. C'est déjà au cours de l'année 2018 qu'on avait constaté une progressive augmentation de l'activité des essais, que ce soit le nombre d'essai par mois et le nombre d'événements sismiques par essais. La quasi totalité des essais sont constitué de séismes de très faible magnitude ($M < 1$) et localisés à des profondeurs considérés comme relativement superficielle (entre -0.5 et 0.5 km) centrées sous le dôme volcanique. Cette sismicité peut être considéré comme l'activité normale du volcan car très similaire à la sismicité observée depuis plusieurs années. Bien qu'importante en terme de nombre, elle ne contribue cependant que très peu à l'énergie totale libérée au cours de l'année.

La majorité de ces événements sismiques ont été classés comme des séismes de type Hybride (de faible magnitude : $M < 1$), avec un contenu haute fréquence (15-35 Hz) en début des formes d'ondes, puis un contenu plus basse fréquence (2-10 Hz) dans la coda du signal. Ces caractéristiques spectrales sont similaires à l'activité sismique d'origine volcanique dominante observée au cours de l'année précédente, ce qui implique une continuité des sources sismiques et des processus qui les engendrent.

Les événements de type Hybride sont produits par des phénomènes de fracturations et de résonances de l'encaissant liées à la propagation de fluides. Vu la distribution superficielle des hypocentres (majoritairement à des profondeur entre -0.8 km et 0.8 km), cette activité sismique témoignent de la vivacité du système hydrothermal du volcan.

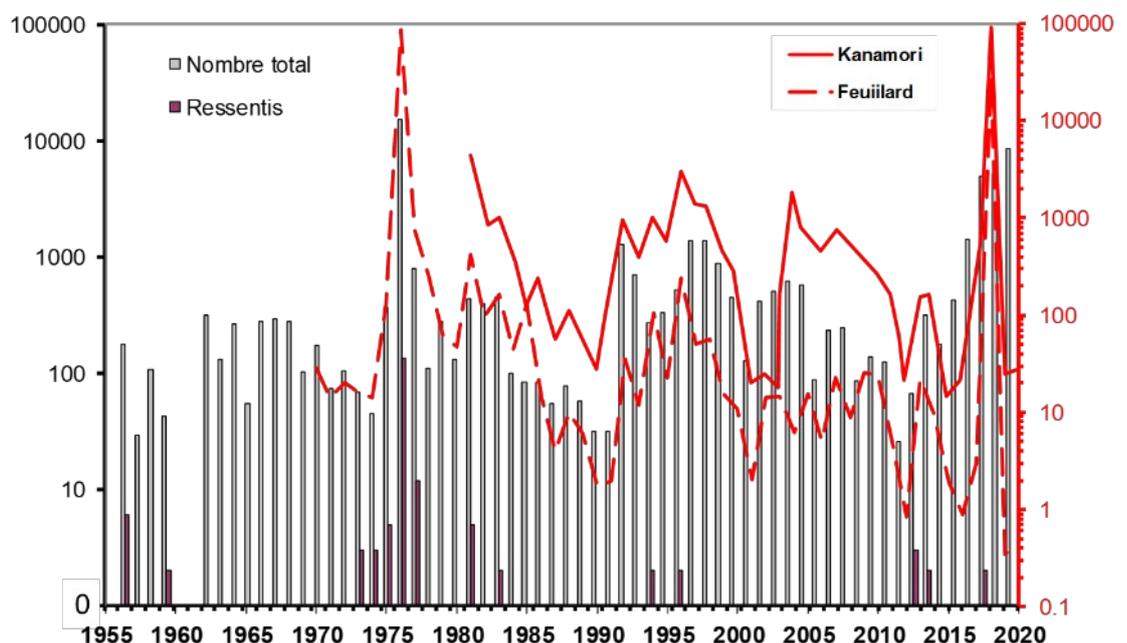


Figure 1.5. Sismicité volcanique annuelle cumulée de la Soufrière depuis 1955. Sont reportés le nombre de séismes détectés (barres grises), le nombre de séismes ressentis (barres noires), et l'évolution de l'énergie dissipée (lignes rouges) en MJ. Uniquement les séismes volcano-tectoniques sont représentés. Deux calculs d'énergie libérée sont reportés. Notez que l'échelle logarithmique des ordonnées a été modifiée pour afficher les valeurs nulles dans le nombre de séismes ressentis.

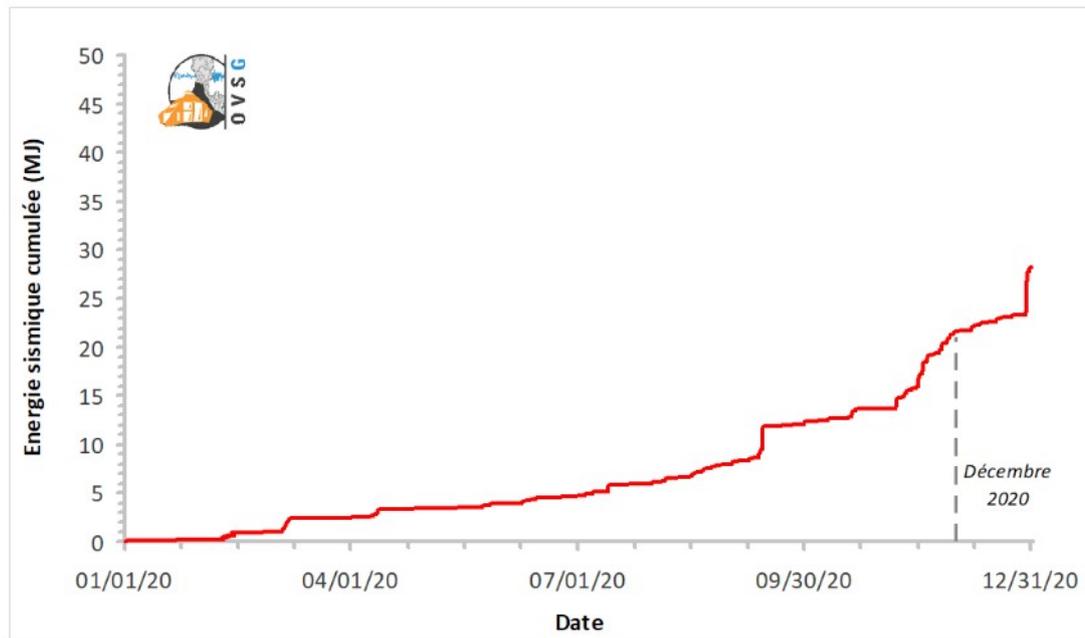


Figure 1.6. Diagramme semi-logarithmique de l'énergie sismique (méthode Kanamori) cumulée et libérée des séismes localisables, sur base journalière, par l'activité volcanique du 1er janvier au 31 décembre 2020. L'énergie sismique libérée dans cette période (28 MJ) est très faible si comparée à l'année 2018 et en ligne avec celle de 2019 (25 MJ).

(1) : 1 mégajoule = 1 MJ = 10⁶ Joules ; 1 gigajoule = 1 GJ = 10⁹ Joules ; 1 térajoule = 1 TJ = 10¹² Joules . A titre d'exemple, il faut un séisme de magnitude 6 pour rayonner sous forme d'énergie élastique la même quantité que l'énergie dégagée par le bombardement d'Hiroshima (63 TJ). Une augmentation de 1 point sur l'échelle des magnitudes équivaut à environ 32 fois plus d'énergie ; par exemple un séisme de magnitude M=4 libère environ 900 fois plus d'énergie qu'un séisme de magnitude M=2.

Depuis début 2017 l'OVSG-IPGP a amélioré ses réseaux de capteurs qui permettent d'acquérir des données sismiques à une résolution sans précédent. Couplé à des traitements de données affinés, ceci permet de détecter un nombre plus important de séismes de très faible magnitude. Cependant, on observe une progression de la sismicité depuis début 2018. Dans la première partie de l'année 2018 cette progression a culminé avec la crise très énergétique de fin Avril 2018 (Figure 1.7). En outre depuis le 4 août 2018, l'OVSG-IPGP enregistre une nouvelle augmentation marquée du nombre de séismes, distribués en essaims sismiques de très faible énergie qui se succèdent de manière rapprochée dans le temps. À la fin de ce mois-ci, nous avons détecté trois essaims liés à cette activité sismique de faible énergie. En date du 31 décembre 2020, l'OVSG-IPGP a donc détecté 47 essaims (Figure 1.7). Cette augmentation de la sismicité enregistrée depuis le 4 août 2018 n'est donc pas uniquement liée à cette meilleure résolution des réseaux d'observation.

Depuis le 12 novembre 2018 nous communiquons des observations scientifiques quotidiennement lorsque nous détectons un essaim sismique et ce pendant son évolution jusqu'à sa fin.

Nous avons considéré qu'il est important de communiquer sur l'occurrence de cette recrudescence de l'activité sismique liée à la fracturation même si elle reste de très faible énergie. Cependant, cette recrudescence marque un changement dans le comportement de La Soufrière

pendant les derniers mois qui implique d'autres processus liés à la circulation des fluides. Une intensification de cette tendance pourrait avoir des implications sur les phénomènes qui caractérisent le sommet de la Soufrière. En effet, on ne peut pas exclure la possibilité que se produisent de manière soudaine et très localisée les phénomènes suivants : formation de geyser avec projection de boue brûlante et acide, projections de cendres et de fragments sur quelques mètres, vapeur soudaine de liquide en surpression, ainsi que l'ouverture de nouvelles fumerolles

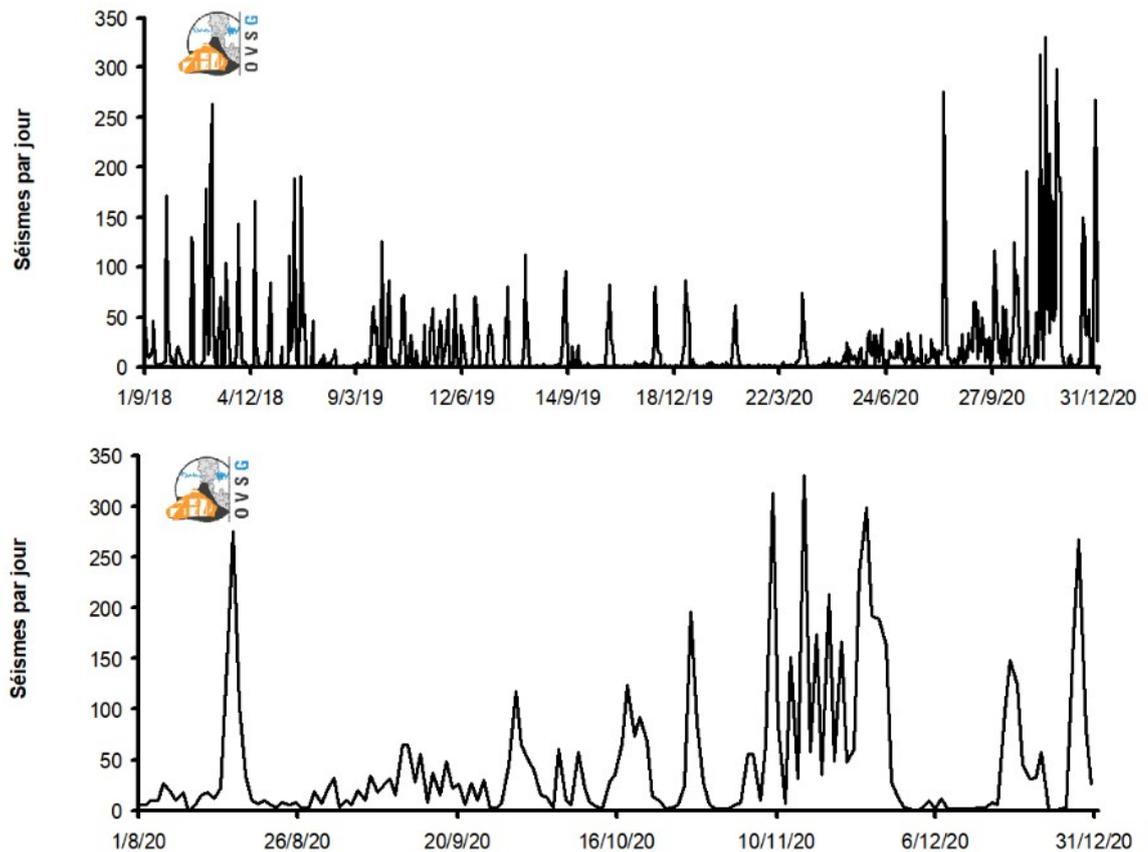


Figure 1.7. Nombre de séismes par jour depuis début 2018 (panneau en haut) et depuis août 2020 (panneau en bas). Quarante-sept essais de séismes de très faibles magnitudes peuvent être identifiés depuis le 4 août 2018. A partir de cette date, la figure montre plus de quarante-sept pics, car un essaim peut avoir différents pics et parce que les pics de faible amplitude ont un taux de sismicité inférieur à celui qui fait l'objet de la communication.

La Figure 1.7 montre une baisse de la fréquence de récurrence des essais sismiques depuis septembre 2019, chose qui n'implique pas une diminution de l'énergie sismique moyenne libérée depuis août 2018. Un paquet assez continu de sismicité peut être observé depuis mai 2020, accompagné par un retour de la sismicité en essaim à partir du mois de août 2020.

Déformations

Les déformations sont mesurées par le *Global Navigation Satellite System* (GNSS), qui englobe les systèmes GPS (USA), Galileo (UE), GLONASS (Russie) et Compass (Chine), et par l'extensométrie. Le réseau GNSS s'étend sur tout le sud Basse – Terre afin de mettre en évidence des mouvements à différentes échelles. a) à l'échelle du sud Basse-Terre, distale par rapport au dôme de La Soufrière, pour mettre en évidence d'éventuels mouvements de matière provenant des zones plus profondes du système magmatique ; b) sur le pourtour du dôme, au niveau du système hydrothermal peu profond (≤ 2 km) ; c) au niveau des déformations très superficielles du dôme, en complément de l'extensométrie sur les fractures.

L'analyse des déformations ne se limite pas à l'année 2020 car ces déformations sont petites. Sur plusieurs années, les réseaux intégrés de mesure des déformations à l'échelle du massif ne montrent pas de signes particuliers (GPS continu).

À l'échelle du sud Basse-Terre, nous n'observons pas de mouvements qui mettent en évidence un apport significatif de masse en profondeur. À l'échelle du dôme, les mouvements sont globalement plus importants au sommet de l'édifice où l'on mesure parmi les plus fortes déformations horizontales et verticales depuis la création du réseau en 1995. Sur le dôme, le signal de déformation horizontale est globalement radial (3 à 7 mm/an \pm 0,2 mm). En revanche, les données GNSS mettent en évidence, sur le flanc sud de La Soufrière, l'existence d'un mouvement lent et stable vers le sud-ouest jusqu'à 10 mm/ans \pm 0,2 mm (Figure 1.8).

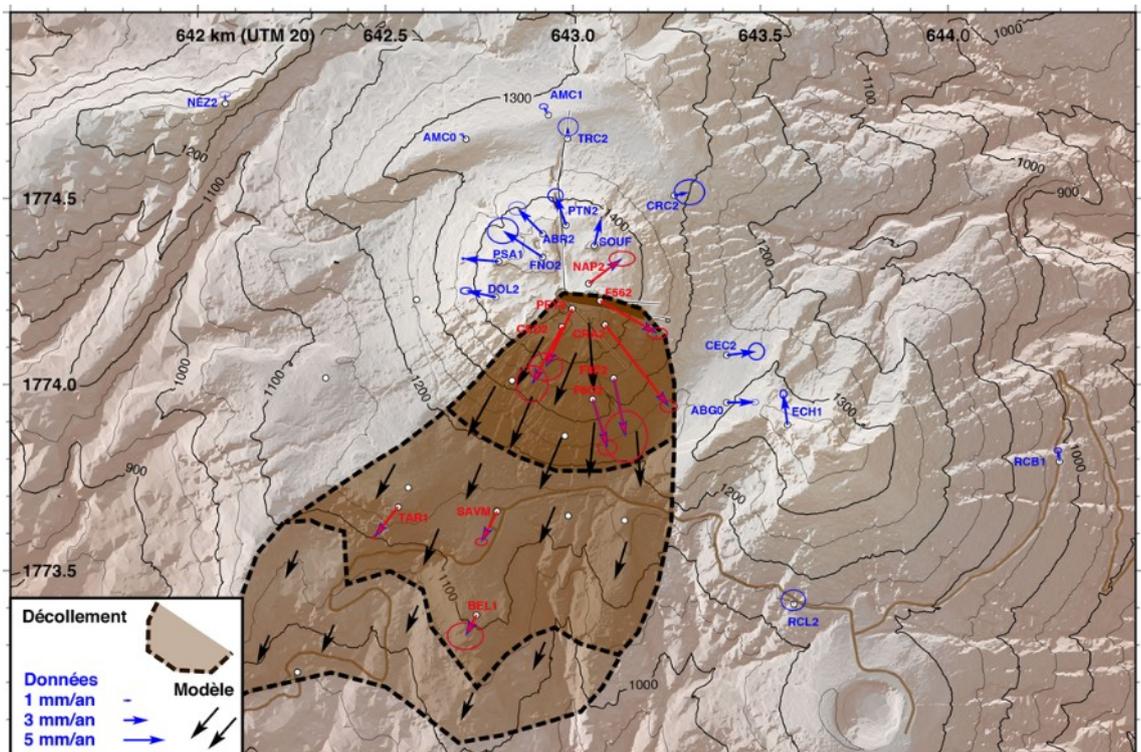


Figure 1.8 : Vecteurs de déplacement horizontal du sol GNSS (sur 24 ans de mesures) sur le complexe volcanique de La Soufrière. A bien remarquer le décollement du flanc sud-ouest du volcan. Pour ces points on propose un modèle de décollement d'une instabilité de flanc (type glissement de terrain) dans le sens de la pente.

Pour ce modèle de décollement, en fonction de l'amplitude des vecteurs on peut distinguer une première zone sommitale avec des vitesses de 5 à 12 mm/an jusqu'à la base du dôme, une deuxième zone intermédiaire (SAVM, TAR1, BEL1) avec des vitesses de 3 à 5 mm/an jusqu'à la base du ressaut topographique de Tarade, et une éventuelle troisième zone plus lente jusqu'au Bain Jaune (mesures en cours).

Le champ de déformations observé sur la Soufrière traduit le fait qu'il n'y a actuellement aucune évidence d'activité profonde importante telle qu'une surpression dans la chambre magmatique. En revanche, les petites déformations localisées sur le dôme suggèrent l'existence de phénomènes superficiels qui pourraient être des surpressions de vapeur d'eau ou de petits mouvements gravitaires ou tectoniques.

En particulier, une augmentation de la vitesse d'ouverture semble caractériser la dynamique observée à certain sites, notamment faille du 8 juillet 1976. Ces mouvements d'ouverture peuvent être partiellement compensés, localement, par la fermeture d'autres fractures. En 2016 cette ouverture était associée à une fermeture progressive des fractures de la zone Nord du dôme (Gouffre Dupuy et Fente du Nord) de l'ordre de **-5 mm** pour les variations les plus importantes. En 2017 – particulièrement durant la seconde moitié de l'année – nous observons à ceux sites une reprise du mécanisme extension d'ouverture. En 2018 la tendance vu en 2017 de ouverture generale des fissures a accéléré, même si un épisode de fermeture plutôt générale des fissures est visible autour du séisme du 27 Avril (M = 4.1). En 2019 on a pu constater de phase de stase et en **2020** la reprise du régime observé en 2018.

De toute manière, les mesures d'extensométrie des fractures, depuis la création du réseau en 1995, montrent une tendance générale, de longue période, d'ouverture des failles et fractures dans les zones fumeroliennes actives du sommet ainsi que le long de la Faille du 30 Août. Il s'agit d'une tendance de l'ordre de **+35 mm** en 10 ans pour les variations les plus importantes au niveau du Cratère Napoléon (Figure 1.9) et **+13 mm** sur la Faille du 30 Août et la faille du 8 juillet 1976

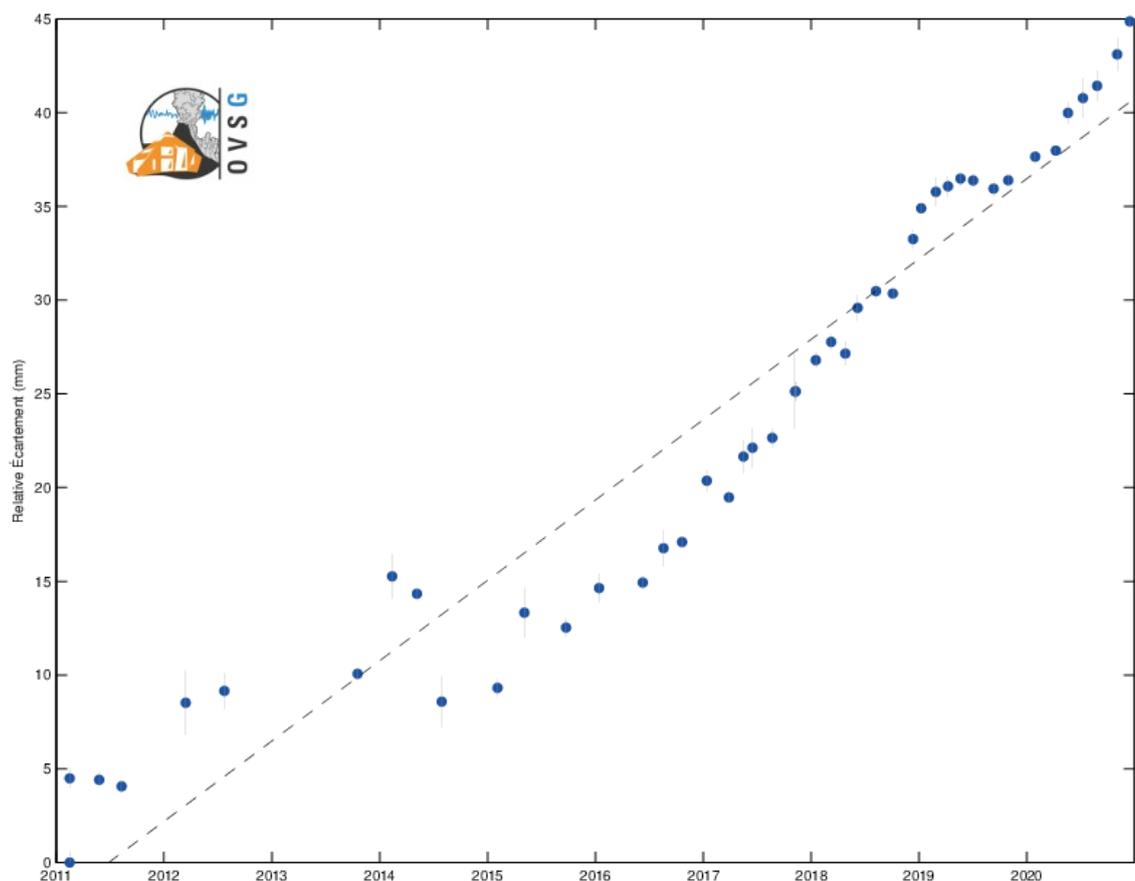


Figure 1.9 : Écartement radial en millimètres mesuré au Cratère Napoléon durant les derniers 10 ans et jusqu'au 31 décembre 2020. Situé au sommet du dôme, le Cratère Napoléon est le site où nous enregistrons en général les déformations les plus amples ainsi que l'apparition de nouvelles fumerolles très actives et la progression d'une anomalie thermique dans le sol avec des températures qui oscillent entre 50 et 92 °C. Le taux d'ouverture moyen mesuré au cratère Napoléon est de 9 mm/an durant l'année 2020, c'est une valeur haute comparée aux 4 mm/an observée en moyenne sur les dix dernières années.

Météorologie au sommet

Au cours des premiers cinq mois de 2018 (jusqu'au début de la saison cyclonique) les vents ont eu une vitesse moyenne 35 km/h et une direction moyenne E-NE. La température a varié entre 7.3 °C et 35.8 °C avec une valeur moyenne de **15.9 °C**. La pluviométrie cumulée durant les six mois de mesure s'élève à 1566.2 mm.

Du 1^{er} juin au 31 décembre 2018 les vents ont eu une vitesse moyenne de 34.9 km/h et une direction moyenne E-NE, mais avec une plus forte dispersion et des rafales mesurées à 84.7 km/h. La température a varié entre 9.4 °C et 32.2 °C avec une valeur moyenne de **17.3 °C**. La pluviométrie cumulée durant les six mois de mesure s'élève à 1642.6 mm.

Les conditions atmosphériques jouent un rôle sur l'activité volcanique superficielle, notamment sur l'activité du système hydrothermal. Les paramètres mesurés peuvent donc être pris en compte dans le traitement et l'interprétation des données géochimiques, géophysiques et phénoménologiques du réseau de surveillance.

Conclusion sur l'activité volcanique de la Soufrière en 2020

L'activité de la Soufrière enregistrée en **2020** montre d'une coté une relative stabilité après l'activité 2018 et de l'autre une légère augmentation de l'activité du système hydrothermal par rapport à 2019. Cette activité est liée à la circulation et de l'interaction des gaz chauds et de la vapeur sous pression dans la roche poreuse et fracturée. Ce type d'activité produit typiquement de micro-séismes de faible énergie localisés à quelques centaines de mètres sous le dôme, avec une tendance, depuis 2007, à l'augmentation des séismes longue période, témoignant de la vivacité des circulations hydrothermales dans le dôme. Cependant, depuis août 2018 nous assistons à un processus cyclique de circulation du fluide hydrothermal plus superficiel très vivace, presque à la base du système fumerollien et qui produit très nombreux essaims de micro-séisme. Leur cyclicité devrait être due au temps caractéristique de circulation convective dans l'édifice volcanique.

Nous interprétons ces phénomènes comme une conséquence de l'injection anormale de gaz magmatiques profonds à la base du système hydrothermal à une profondeur entre 2 et 3 km sous le sommet qui a caractérisé l'année 2018. Ceci a engendré, rappelons-le, un processus récurrent de surchauffe et de surpression du système hydrothermal qui se traduit par : 1) des perturbations de la circulation des fluides hydrothermaux ; 2) l'évolution de l'activité des fumerolles au sommet dont une témoigne de projection de boue brûlante et acide sur quelques mètres ; 3) une augmentation de la sismicité volcanique en essaim ; 4) quelques séismes volcaniques ressentis (quatre entre février et avril 2018) dont un séisme de magnitude M4.1 le 27 avril 2018, le plus fort depuis 1976 ; 5) des déformations de faible amplitude et limitées au dôme de La Soufrière de l'ordre de 3-7 mm/an et la poursuite de l'ouverture des fractures sommitales ; 6) la fluctuation des débits du gaz fumerollien issus d'un réservoir hydrothermal pressurisé ; 7) une progression des anomalies thermiques dans le sol au sommet de La Soufrière.

C'est depuis le 4 août 2018, après le pic de crise (séisme de M 4.1 le 27 avril 2018) que l'OVSG-IPGP enregistre en outre une nouvelle augmentation marquée du nombre de séismes, distribués en essaims sismiques (total de 30 essaims avec un pic de au moins 50 séismes par jour en date du 31 décembre 2019) de très faible énergie qui se succèdent de manière rapprochée dans le temps. Cette augmentation de la sismicité enregistrée depuis le 4 août n'est donc pas uniquement liée à cette meilleure résolution des réseaux d'observation.

L'OVSG-IPGP a donc établi un nouveau protocole de communication des phénomènes liés à l'activité de La Soufrière. Depuis le 12 novembre 2018 nous communiquons des observations scientifiques quotidiennement lorsque nous détectons un essaim sismique et ce pendant son évolution jusqu'à sa fin.

Nous avons considéré qu'il est important de communiquer sur l'occurrence de cette recrudescence de l'activité sismique liée à la fracturation même si elle reste de très faible énergie, car lié à l'expulsion d'énergie déterminé par l'injection anormale de gaz magmatique précédente. Cette recrudescence, même si de faible énergie marque donc un changement dans le comportement de La Soufrière qui perdure en 2020 et implique d'autres processus liés à la circulation des fluides. Une intensification de cette tendance pourrait avoir des implications sur les phénomènes qui caractérisent le sommet de la Soufrière. En effet, on ne peut pas exclure la possibilité que se produisent de manière soudaine et très localisée les phénomènes suivants : formation de geyser avec projection de boue brûlante et acide, projections de cendres et de fragments sur quelques mètres, vapeur soudaine de liquide en surpression, ainsi que l'ouverture de nouvelles fumerolles.

En outre, le risque de déstabilisation de tout ou d'une partie du dôme n'est pas à exclure, sachant que c'est l'un des phénomènes les plus fréquents dans l'histoire de la Soufrière (au moins 10 événements dans les derniers 15 000 ans). Une telle déstabilisation entraînerait une avalanche de débris de plusieurs mètres d'épaisseur dans les vallées. Le monitoring de ce phénomène est actuellement assurée par le réseau de mesure de déformations disposé sur le dôme et alentours.

Sur la base des observations de l'OVSG-IPGP enregistrées au cours du 2020 et résumées dans ce rapport, et en accord avec les dispositions prévues par les autorités, le niveau d'alerte volcanique (tableau ci-après) est resté :

VIGILANCE = JAUNE

Définition des niveaux d'activité volcanique pour la Soufrière de Guadeloupe

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	← OVSG-IPGP →		← Préfecture →	
Niveaux d'alerte	VERT = Pas d'alerte	JAUNE = Vigilance	ORANGE = Pré alerte	ROUGE = Alerte

La probabilité d'une activité éruptive à court terme reste faible. Cependant, compte tenu du regain d'activité sismique et fumerolienne enregistré depuis février 2018, un changement de régime du volcan a été constaté tel qu'on ne puisse pas exclure une intensification des phénomènes dans le futur. En conséquence, l'OVSG-IPGP est en état de vigilance renforcée.

Les émanations gazeuses aux abords et sous le vent des fumerolles principales du sommet (notamment le Cratère Sud, le Tarissan, et le Gouffre 1956) présentent, depuis 1998, des risques avérés d'irritation et de brûlures (yeux, peau, voies respiratoires) et de projection de boue brûlante et acide.

Compte tenu de l'évolution décrite ci-dessus et des autres observations sur l'activité, l'OVSG-IPGP considère qu'il est important de garder, à titre précautionneux, une distance de au moins 50 m de rayon autour des principaux centres d'émission de gaz fumerolien (Cratère Sud Sud, Cratère Sud Central, Cratère Sud Nord, Napoléon Nord, Napoléon Est, Gouffre 1956, Gouffre Tarissan).

En considération de l'évolution de la zone d'anomalie au sommet (avec la propagation de chaleur au sol ; la recrudescence de l'activité des fumerolles, accompagnée de l'apparition dans le temps de nouveaux centres d'émission et de projection de boue et de fragments ; les indications de l'impact au sol et sur la végétation de gaz soufrés et acides) et donc d'une général augmentation des zones d'instabilité, la Préfecture de Guadeloupe avec l'arrêté n° 2019/001 CAB SIDPC du 14 janvier 2019 a institué un accès réglementé au sommet du volcan de la Soufrière, basé sur l'identification d'un périmètre de sécurité et sur l'interdiction à toute personne non-autorisée de le franchir.

1.2 Activité sismique régionale

L'arc insulaire des Petites Antilles résulte du plongement des plaques Américaines sous la plaque Caraïbe (Figure 1.10). C'est une subduction active avec une vitesse de convergence de 2 cm/an, faisant de notre archipel une région à forts aléas volcanique et sismique. Les séismes les plus importants en terme de risque sont directement liés au processus de frottement entre les deux plaques (séismes de l'interface de subduction) ; d'autres souvent moins forts résultent de la déformation de la plaque Caraïbe ; d'autres encore, plus profonds, correspondent à la rupture de plaque océanique plongeante sous la Caraïbe (séismes de profondeur intermédiaire). Durant la période historique, plusieurs séismes ont causé des dégâts et parfois des victimes en Guadeloupe (les plus forts en 1735, 1810, 1843, 1851, 1897, 2004 et 2007).

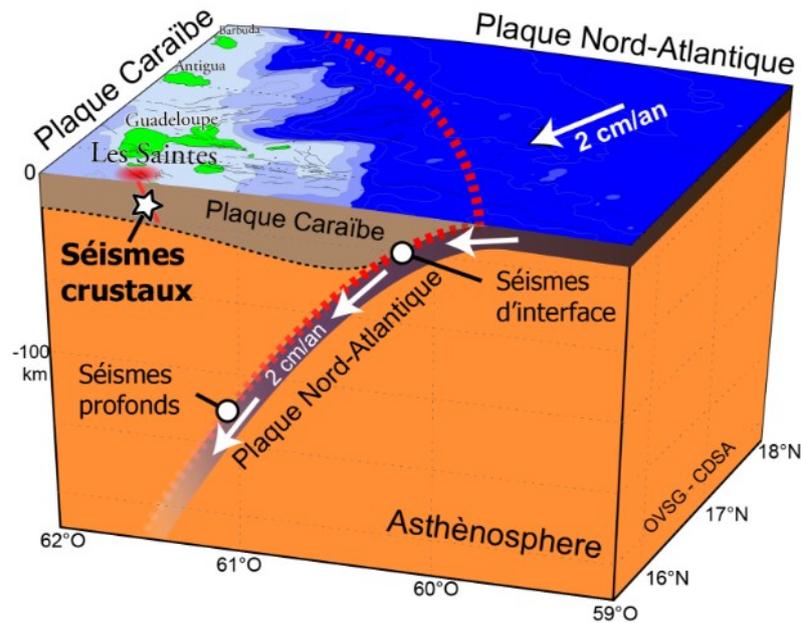


Figure 10. Schéma simplifié de la subduction active aux Antilles avec les différents types de séismes tectoniques possibles. Le séisme du 21 novembre 2004 ainsi que toutes ses répliques résultent de la déformation de la plaque Caraïbe (séismes crustaux).

Un réseau sismologique à l'échelle de l'arc Antillais

La mutualisation des données sismologiques entre les partenaires régionaux des Petites Antilles, le SRC de l'Université de Trinidad et Tobago, le KNMI des Pays Bas, l'Observatoire Volcanologique de Montserrat, l'USGS, le PRSN de l'Université de Mayaguez à Porto Rico, les OVS des Antilles de l'IPGP, permet de construire un réseau à l'échelle de l'arc. Ce réseau est présenté en annexe. Les données de chaque station de ce réseau sont reçues à l'OVSG, soit par satellite, soit par Internet.

Ainsi depuis 2009, la localisation des séismes se fait à l'échelle de l'arc. Cet effort améliore considérablement notre vision de la sismicité, maintenant à l'échelle pertinente de l'objet géologique majeur de la région, pour améliorer la compréhension des processus sismotectoniques et volcanique de la subduction antillaise.

Sismicité régionale

Si on se limite à un rayon approximatif de 550 km autour de la Guadeloupe, un total de **1144 séismes tectoniques** ont été enregistrés pendant l'année 2020 (1895 en 2019 et 1312 en 2017), de magnitude maximale **5.6**. **Ces chiffres ne considèrent pas les séismes** hors du réseau Guadeloupe : on rappelle, par exemple que une activité sismique importante est commencé à Porto Rico le 28 Décembre 2019 et a perduré pendant toute l'année 2020, avec un M_w 6.4 le 7 janvier 2020.

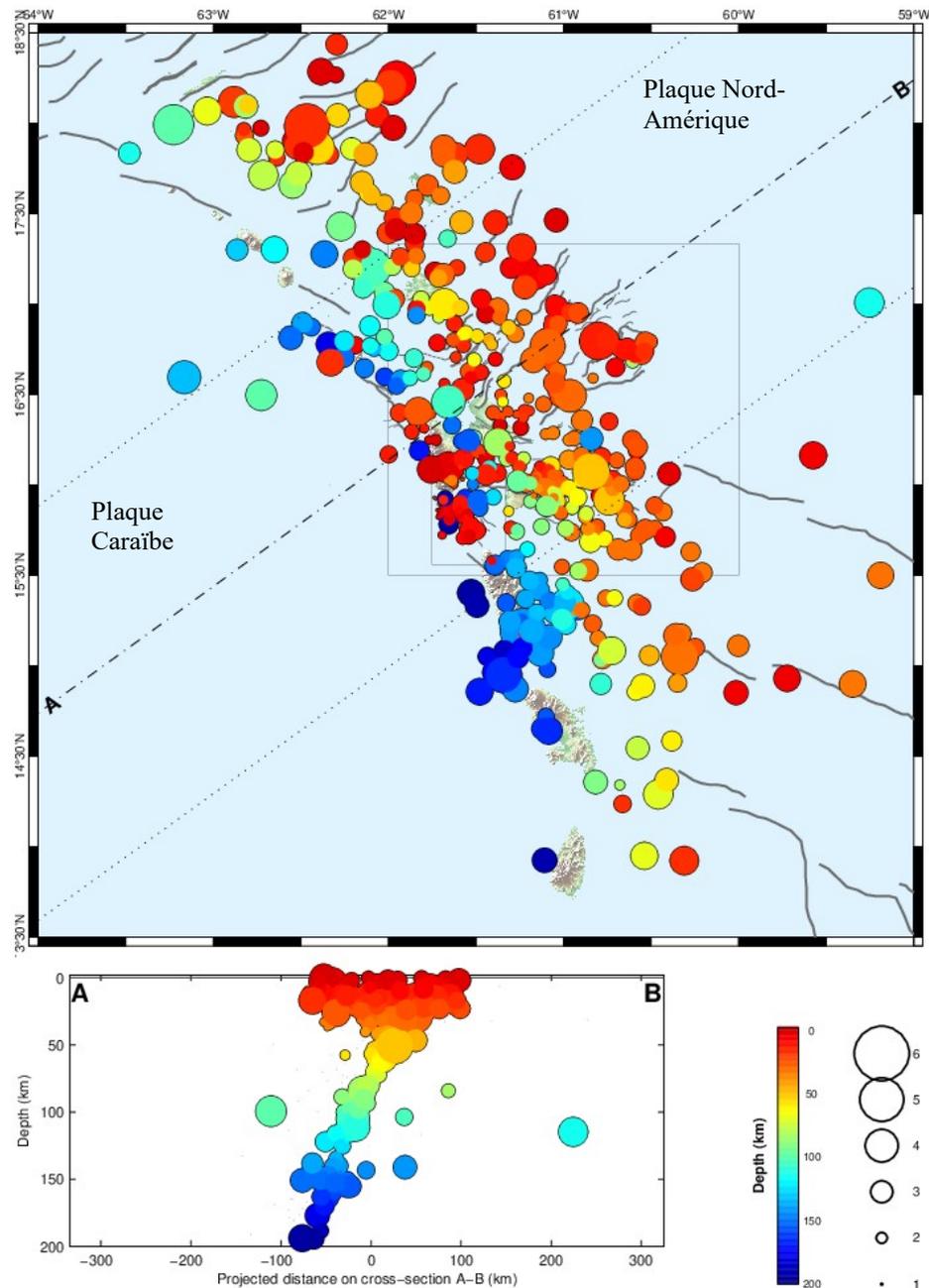


Figure 1.11. Hypocentres et magnitudes des séismes localisés durant l'année 2020, sous une région de 550 km autour de la Guadeloupe. La vue verticale correspond à la projection des séismes situés à moins de 100 km de part et d'autre de l'axe A-B, perpendiculairement au plan de subduction.

De nombreux séismes de très faible magnitude, et, de ce fait, enregistrés par une ou deux stations seulement (c'est le cas de beaucoup de micro-séismes des Saintes et du nord

Dominique, ainsi que du centre-sud de la Dominique où en 2019 on avait enregistré la reprise de l'unrest volcanique), ne sont pas localisables en routine. Cependant les temps d'arrivées de ces séismes sont archivés dans les bulletins et les signaux associés sont conservés par l'Observatoire et l'IPGP.

La carte de la sismicité 2020 (Figure 1.11) montre une importante sismicité superficielle à l'est et au nord-est de la Guadeloupe, le long de grands systèmes de failles NW-SE, distribuées entre Marie Galante et Barbuda. Cette sismicité est aussi liée à l'activité de l'interface de subduction (zone de contact entre les deux plaques ; Figure 1.10). La répartition géographique de l'activité sismique est comparable à celle des années précédentes. Comprenant les séismes avec épicerentre dans la zone de la Soufrière, au moins **15 séismes** ont été **ressentis** en 2020 en Guadeloupe (Tableau 1). En 2020, les essais sismiques sont localisés principalement dans la zone de réplique des Saintes mais également à l'est de la Martinique et au nord-est de Barbuda.

Tableau 1. Caractéristiques des séismes régionaux ressentis en Guadeloupe, à Saint-Martin et Saint-Barthélemy en 2020 : dates et heures locales (GMT-4), magnitudes, profondeurs, zone épicerentrale, intensité maximale (échelle EMS98) et lieu. Tous ces séismes ont fait l'objet de communiqués disponibles sur le lien www.ipgp.fr/ovsg/actualites-ovsg, à la rubrique Actualité.

Date	Magnitude	Prof (km)	Zone épicerentrale	Intensité max (*)
13/11/20	4.6	100	17 km ouest-sud-ouest de Saint-Martin	I-II
09/10/20	5	17	42 km est-nord-est de Saint-Barthélemy	IV-V
07/10/20	5.6	55	137 km ouest de Saint-Martin	II-III
13/09/20	3.6	78	25 km sud-est de Saint Barthélemy	I-II
03/09/20	3.8	20	23 km est-nord-est de Saint-Martin	II-III
24/08/20	3.5	14	53 km nord de La Désirade	I-II
06/08/20	2.8	12	2 km nord de Goyave	II-III
31/05/20	3.9	30	23 km nord-nord-est de La Désirade	II-III
15/05/20	4.4	9	102 km est-nord-est de Saint-Barthélemy	I-II
05/05/20	1.8	9	2 km ouest-sud-ouest de Terre de Haut	I-II
03/05/20 (**)	1.8-2.1 (essaim)	4-5	Sud, sud-ouest, sud-est Terre de Bas (rayon de 2 à 5 km)	I-IV
29/02/20	3.9	105	14 km ouest-nord-ouest de Port-Louis	I-II
24/01/20	1.7	2.9	1 km sud-est de Terre de Bas	I-II
22/01/20	2.7	3	<1 km ouest-est Terre de Bas	IV-V
08/01/20	5.1	141	77 km sud de Grand-Bourg	I-II

(*) intensités maximales en Guadeloupe et/ou St-Martin et/ou St-Barthélemy (d'après les témoignages du BCSF www.franceseisme.fr)

(**) essaim de 21 séismes, dont 4 majeures

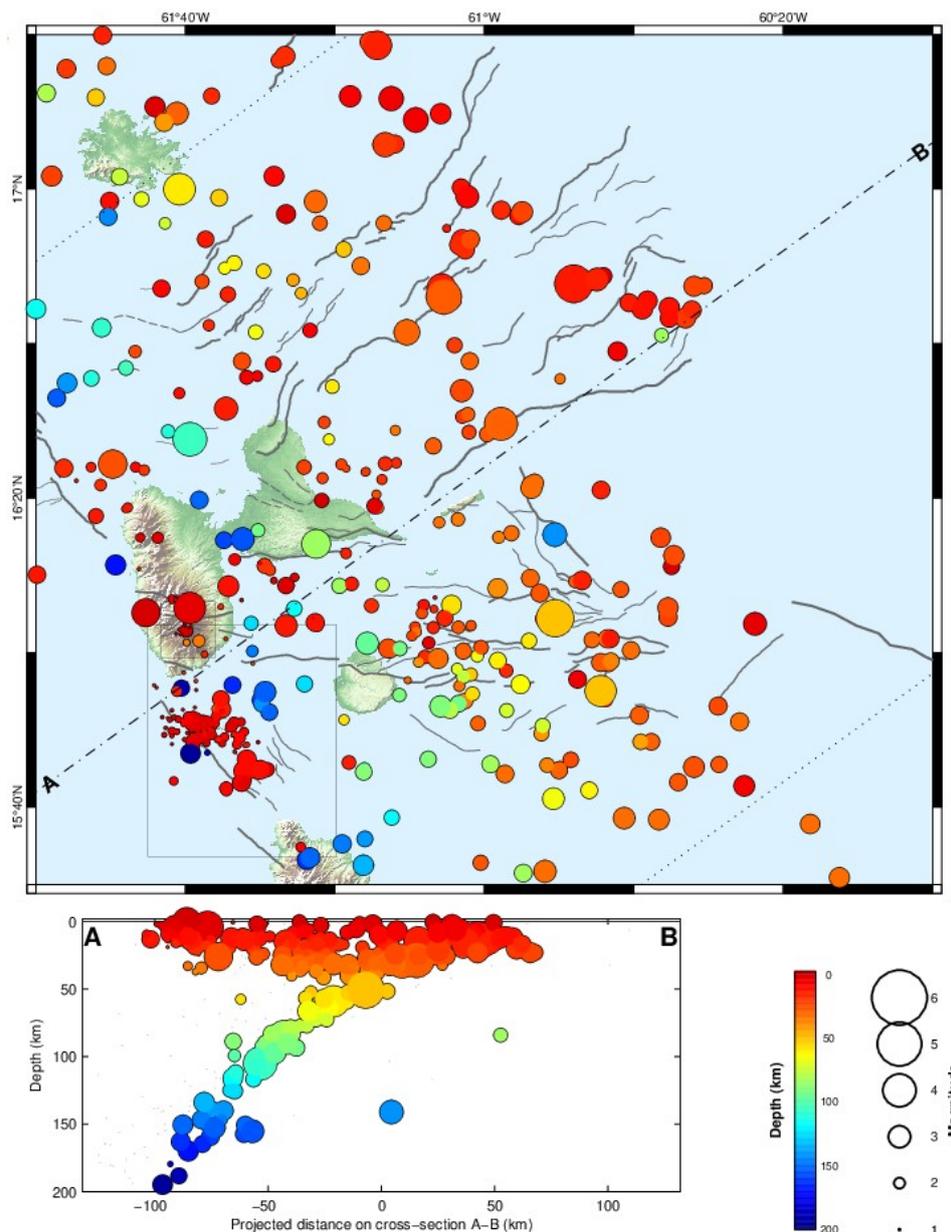


Figure 1.12. Hypocentres et magnitudes des séismes localisés durant l'année 2020, sous la zone proche de la Guadeloupe. Traits noirs : failles principales connues (d'après Feuillet et al., 2000)

L'activité du nord-est de Barbuda

Le dimanche 31 Mai, un séisme mineur ($M=3.9$) d'origine tectonique a été enregistré à 22h53 TU (18h53 locale) et localisé à 23 km au nord-nord-est de La Désirade, à une profondeur de 30 km de profondeur. Ce séisme a été ressenti en Guadeloupe (intensité III–IV en Guadeloupe continentale).

Le 24 Août, un séisme mineur ($M=3.5$) d'origine tectonique a été enregistré à 07h31 TU (03h31 locale) et localisé à 53 km au nord de La Désirade à une profondeur de 14 km. Ce séisme a été ressenti en Guadeloupe (intensité macroscopique II).

Ces séismes sont liés aux processus de déformations associées à la subduction de la plaque Amérique sous la plaque Caraïbe. Ce séisme a été ressenti par les populations des îles de l'arc Antillais.

La sismicité dans la zone des Saintes

Les séismes des Saintes du 21 novembre 2004 de magnitude 6.3 et du 14 février 2005 de magnitude 5.7, ont été suivi de plus de 35 000 séismes.

Au cours de l'année 2020, les réseaux de l'observatoire ont enregistré **393** séismes entre les Saintes et la Dominique, entre <1 et 33 km de profondeur (Figure 1.12) et de magnitude maximale **2.7**. En 2020, cette sismicité s'est spatialement organisée en deux groupes, (1) sous l'archipel des Saintes, à la terminaison nord de la faille du Roseau, (2) au milieu du canal de la Dominique, à la terminaison sud de la faille du Roseau.

Malgré la proximité de l'archipel et de la faible profondeur de l'activité sismique (moins de 8 km pour la plupart des séismes), peu de séisme sont typiquement ressentis aux Saintes. En particulier on signale les suivants qui ont marqué cet essaim :

Le 22 janvier 2020, un séisme léger ($M=2.7$) d'origine tectonique a été enregistré à 23h59 TU (19h59 locale) et localisé à 1 km à l'ouest de Terre-de-Bas à une profondeur de 3 km. Ce séisme a été ressenti aux Saintes (intensité macroscopique IV-V aux Saintes)

Le 24 janvier 2020, un séisme léger ($M=1.7$) d'origine tectonique a été enregistré à 23h49 TU (19h49 locale) et localisé à 1 km au sud-est de Terre-de-Bas à une profondeur de 2.9 km. Ce séisme a été ressenti aux Saintes (intensité macroscopique II-III aux Saintes)

Entre le samedi 2 Mai 23h27 TU (19h27 locale) et le mercredi 5 Mai 15h16 TU (11h16 heure locale), une séquence de 32 séismes d'origine tectonique a été enregistrée dans la zone des Saintes. Les 5 séismes les plus importants sont :

- Le samedi 2 Mai, un séisme mineur ($M=2.0$) d'origine tectonique a été enregistré à 23h27 TU (19h27 locale) et localisé à 4 km au sud de Terre-de-Bas, à 3 km de profondeur

- Le dimanche 3 Mai, un séisme mineur ($M=2.1$) d'origine tectonique a été enregistré à 00h04 TU (samedi 2 Mai à 20h04 locale) et localisé à 5 km au sud-sud-ouest de Terre-de-Bas, à 4 km de profondeur

- Le dimanche 3 Mai, un séisme mineur ($M=2$) d'origine tectonique a été enregistré à 06h51 TU (2h51 locale) et localisé à 4 km au sud-sud-est de Terre-de-Bas, à 2 km de profondeur

- Le dimanche 3 Mai, un séisme mineur ($M=1.8$) d'origine tectonique a été enregistré à 12h47 TU (08h47 locale) et localisé à 4 km au sud-est de Terre-de-Bas, à 2 km de profondeur

- Le mardi 5 Mai, un séisme mineur ($M=1.8$) d'origine tectonique a été enregistré à 06h39 TU (02h39 locale) et localisé à 2 km au ouest-sud-ouest de Terre-de-Haut, à 9 km de profondeur

Ces séismes ont été localement ressentis aux Saintes (intensité II aux Saintes).

Il est difficile de connaître le nombre exact de séismes ressentis par la population. Les habitants des Saintes se sont « habitués » et ne nous signalent plus systématiquement les secousses légèrement ressenties. Un exemple est donné par le bref essaim du 3 Mai 2020 : un service des médias nous a contacté en nous disant que la population avait ressenti au moins un séisme.

Les causes de la sismicité récente aux Saintes sont encore incertaine (origine tectonique, volcanique et/ou morpho-tectonique) : L'état actuel des observations sismologiques (résolution des hypocentres) rend impossible la discrimination d'un de ces scénarios. La prochaine installation (repoussée en 2021 à cause la pandémie COVID 19) d'un sismomètre optique sous-marin prévus dans le cadre du projet de recherche PREST (INTERREG Caraïbe), contribuera fortement à mieux contraindre la sismicité aux Saintes.

La prudence reste de rigueur dans la zone des Saintes car les répliques peuvent encore durer pendant plusieurs années. Suivant leurs localisations (et notamment leurs profondeurs), des séismes de magnitude modérée qui surviendraient dans la zone pourraient être plus ou moins fortement ressentis par la population et pourraient, à l'instar des chocs de novembre 2004 (M6.3) et février 2005 (M5.7), provoquer des dégâts.

1.3 Volcanisme de l'arc des Petites Antilles

Les îles des Petites Antilles forment une chaîne incurvée d'îles volcaniques le long de la marge orientale de la mer des Caraïbes, sur une longueur d'environ 700 km entre Grenade au sud et Saba au nord (Figure 1.13). Cette chaîne d'îles volcaniques est désignée comme « l'arc insulaire des Petites Antilles », conséquence du magmatisme lié à la subduction entre la plaque Amérique et la plaque Caraïbe. L'arc comprend 19 volcans actifs répartis sur 11 îles et 1 volcan sous-marin en activité dans le sud de l'arc (le Kick'Em Jenny). Tous les volcans de l'arc sont du même type, à lave essentiellement andésitique visqueuse, caractérisés par des éruptions souvent explosives. La majeure partie de ces volcans sont en « repos » depuis plusieurs siècles mais restent étroitement surveillés par les différents observatoires volcanologiques des Petites Antilles. **Depuis le début du XX^e siècle**, l'activité éruptive a concerné plusieurs volcans de l'arc :

La Soufrière Hills sur l'île de Montserrat. Après plusieurs siècles de repos, une éruption magmatique majeure a débuté en juillet 1995. Depuis le dernier événement majeur du 11 février 2010, qui s'est caractérisé par un effondrement partiel du dôme, l'activité du volcan décroît. Pour plus d'information, reportez-vous au site du Montserrat Volcano Observatory (www.mvo.ms).

La Soufrière de Guadeloupe. Les 2 éruptions récentes ont été uniquement phréatiques, impliquant une décompression explosive du système hydrothermal et l'éjection de matériaux anciens du volcan sans apport de magma nouveau. L'éruption a été mineure en 1956 et majeure en 1976-1977.

La Vallée de la Désolation (Valley of Desolation) en Dominique. Une seule éruption phréatique, mineure, a été récemment observée en Dominique, dans la nuit du 8 au 9 juillet 1997, dans la partie sud de la vallée.

La Montagne Pelée en Martinique. 2 des plus fortes éruptions magmatiques de la région ont eu lieu en 1902-1905 et 1929-1932. En 1902, les « nuées ardentes » ont détruit les villes de Saint-Pierre et Morne Rouge, provoquant la mort de 28000 personnes en quelques minutes.

La Soufrière de Saint-Vincent. Ce volcan a connu 3 éruptions magmatiques majeures en 1902-1903 (1500 victimes), 1971-1972 et 1979. En Décembre 2021 le Seismic Research Centre de l'Université de West Indies (UWI-SRC) en collaboration avec le National Emergency Management Organization (NEMO) a rapporté que des observations visuelles du 29 décembre 2020 ont confirmé une nouvelle croissance de dôme de lave située au bord de l'ancien dôme de lave de l'éruption du 1979, formant un "dôme sur le bord du dôme". Depuis le 27 décembre 2020 une éruption effusive du volcan s'accompagne avec une activité fumerollienne. Le niveau d'alerte pour le volcan a donc été porté à ORANGE, suivant aussi l'augmentation de l'activité sismique au volcan enregistrée depuis début novembre

Le Kick'em Jenny, volcan sous-marin, localisé à 7.5 km au nord-ouest de Grenade. Le sommet se trouve à environ 180 m sous le niveau de la mer. Il s'agit actuellement du volcan le plus actif

des Petites Antilles. Depuis sa découverte en 1939, au moins 12 éruptions sous-marines ont été identifiées, soit environ une éruption tous les 10 ans. La dernière éruption date de juillet 2015 (voir bilan 2015). Un épisode d'unrest s'est produit Pour plus d'information, reportez-vous au site du Seismic Research Center : <http://www.uwiseismic.com>.

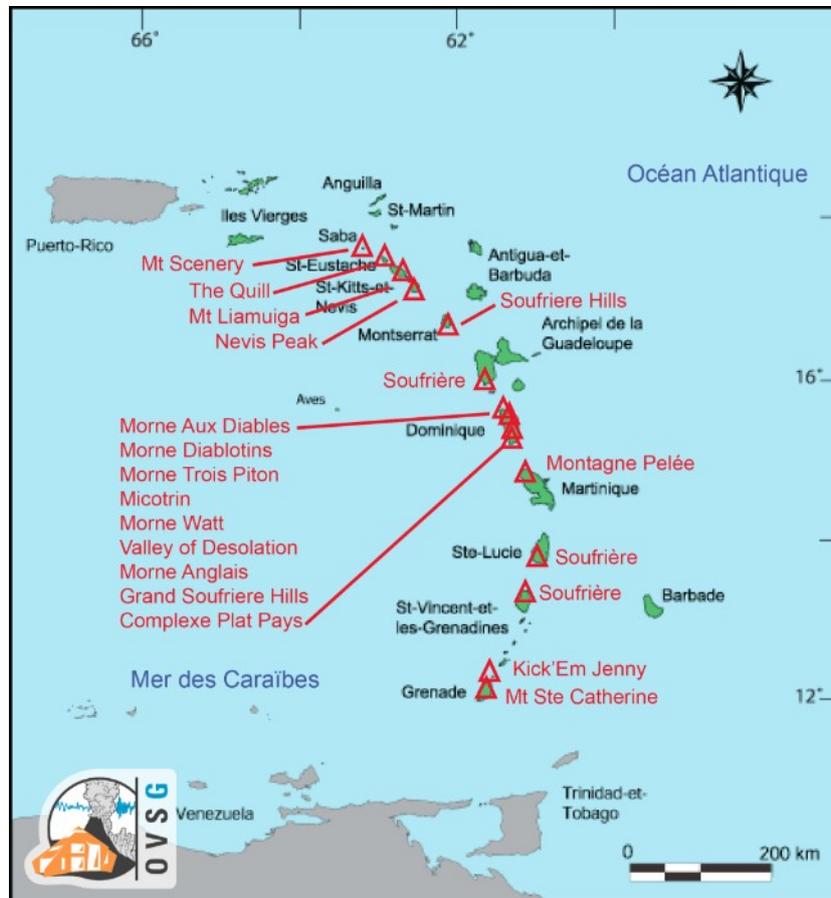


Figure 1.13. Carte des volcans actifs de l'arc des Petites Antilles.

2. Réseaux de surveillance

Les missions de surveillance de l'observatoire se traduisent par la mesure et l'enregistrement continu de données géophysiques et géochimiques. Ces données sont interprétées en temps réel afin de comprendre le fonctionnement global de la Soufrière et de la tectonique au niveau de la Guadeloupe. Cette interprétation est difficile car elle fait appel à des modèles physiques interdisciplinaires complexes qui comportent beaucoup d'inconnu. Elle deviendrait impossible si les données étaient de mauvaises qualités ou trop discontinues. Le bon fonctionnement de chaque station (continuité et qualité de mesure) est donc la clé d'une bonne surveillance.

D'autre part, ces données doivent être archivées de façon à ce que d'autres scientifiques, maintenant ou dans plusieurs années, puissent les utiliser sans équivoque ; c'est en fait la mission de tous les observatoires : acquérir des données de qualité et les archiver de façon complète et exhaustive en terme d'information.

La mise en fiabilité, l'extension et la modernisation des réseaux de surveillance se sont poursuivies en 2020, avec un effort tout particulier sur le contrôle de la qualité des mesures, l'archivage, l'accessibilité et la visualisation temps-réel de ces données numériques.

Un autre fait marquant de cette année 2020 a été le travail réalisé sur un projet de stations multiparamètres en forages incluant l'instillation d'inclinomètres à très haute résolution qui ne sont pour l'instant pas utilisés à l'OVSG. Ce projet bénéficie d'un financement exceptionnel attribué par le Ministère de la Transition Écologique et Solidaire (MTES). Un appel d'offres a été lancé en septembre 2020 pour la réalisation des forages. Cet appel d'offres n'a pas été concluant faute d'entreprises locales pouvant garantir la réalisation de forages répondant au cahier des charges demandé. Un second appel d'offre va être lancé dans le courant du mois d'octobre pour la réalisation de ces forages devrait permettre aux entreprises guadeloupéennes, martiniquaises et métropolitaines de répondre.

Les réseaux opérés par l'IPGP couvrent les disciplines de la sismologie, les déformations, la géochimie des fluides, la météorologie et les phénomènes liés à l'érosion (observatoire INSU ObsErA). Ils sont complétés par des observations visuelles (photos, vidéos) et confrontés aux résultats d'études géologiques ou tectoniques sur les processus fondamentaux (éruptions, failles et subduction). Les réseaux de surveillance mis en place par l'IPGP comprennent ainsi plus de 200 sites de mesures diverses sur le volcan et dans l'archipel (sur 8 îles différentes) dont une **soixantaine de stations automatiques et téléométrées**. Des cartes de réseaux sont présentées en annexe.

bande) ou d'accélération du sol (*accéléromètres*), dans des bandes de fréquence allant de 240 secondes à 125 Hz (Annexes B7, B8). Les stations transmettent en continu (télétransmission radio, radio-modem, satellite ou réseau numérique privé) ou sur déclenchement sur lors de séismes (réseau accélérométrique).

2.1 Réseaux sismologiques

Les réseaux sismologiques enregistrent les mouvements rapides du sol pour détecter et comprendre les mécanismes des séismes liés à l'activité tectonique et volcanique. Les réseaux sont constitués de capteurs de vitesse (sismomètres *courte-période* ou *large-bande*) ou d'accélération du sol (*accéléromètres*), dans des bandes de fréquence allant de 240 secondes à 125 Hz (Annexes B7, B8). Les stations transmettent en continu (télétransmission radio, radio-modem, satellite ou réseau numérique privé) ou sur déclenchement lors de séismes (réseau accélérométrique).

Sismométrie Courte-Période

Stations : 9

Interventions : 28

Le réseau courte-période nous permet de localiser les hypocentres des séismes d'origine tectonique (arc des Petites Antilles) ou volcanique (sous le massif de la Soufrière). Pour les séismes volcaniques, ces localisations sont améliorées par l'utilisation des données provenant du réseau large-bande volcanique. Pour les séismes tectoniques régionaux, ces localisations sont améliorées par l'utilisation des données provenant du réseau régional.

Les stations sont toutes télémétrées par radio UHF/VHF.

L'obsolescence de ce réseau augmente chaque année, la maintenance de certains éléments devient difficile car la technologie utilisée par certains sous ensembles est dépassée.

Le système de numérisation des données analogiques de l'ensemble des stations courtes périodes a été remplacé par deux acquisitions de numérisation de type Centaur de chez Nanometrics.

Depuis 2013 nous modernisons les stations de surveillance du réseau sismologique du volcan. A moyen terme nous souhaitons faire évoluer les 9 sites restants en station avec des acquisitions sismologiques numériques similaire à ceux installés sur le volcan (voir plus bas sismométrie large bande volcanique).

Sismométrie Large-Bande Volcanique

Stations : 11

Interventions : 22

Le réseau large-bande volcanique permet d'enregistrer toute la gamme de fréquence des séismes induits par des phénomènes volcaniques sous la Soufrière, en particulier les déformations lentes engendrées par les mouvements de fluide. Les données de ce réseau permettent également d'améliorer la localisation des séismes volcaniques. Les stations du réseau Courte Période, une fois modernisées, rejoignent ce réseau.

La station Fond Bernard (FNG) a été modernisée avec un numériseur Centaur de chez Nanometrics et un sismomètre de type Trillium compact de chez Nanometrics.

Sismométrie Régionale (VSAT : Communication satellitaire)

Stations : 7

Interventions : 8

En collaboration avec nos partenaires régionaux, OVSM en Martinique et SRC à Trinité et Tobago, le réseau large-bande régional contribue à la surveillance opérationnelle de la sismicité à l'échelle de l'arc des Petites Antilles et la production de données de grande qualité pour la recherche

fondamentale. Il contribue également au système d'alerte aux tsunamis dans la mer des Caraïbes (SATCAR). Les données temps réel de ce réseau sont mises à disposition via un flux seedlink par le centre de données de IPGP à Paris. Elles sont utilisées par le NEIC de l'USGS et le PTWC, centre d'alerte aux tsunamis pour le SATCAR.

Ces stations sont conçues pour enregistrer toute la bande de fréquences des déformations, du centième de secondes à plusieurs années, c'est-à-dire non seulement les vibrations sismiques rapides et lentes, mais aussi les très lentes déformations de quelques millimètres par an qui se produisent sans libération d'ondes sismiques et qui correspondent aux accumulations ou relâchements de déformation sur les failles en profondeur. Afin de remplir cet objectif, ces stations sont équipées de plusieurs capteurs : un sismomètre large-bande très sensible, un accéléromètre, un GPS.

Plusieurs éléments se retrouvent dans une station :

- L'extrême sensibilité des sismomètres large-bande (Trillium240 et Trillium 120) impose d'installer les capteurs dans des caves sismiques de 2 m de profondeur, isolées des variations de température, et loin des sources de bruits perturbateurs (moteurs, routes à grande circulation, carrières, et même la houle).
- Un capteur accélérométrique permet l'enregistrement du signal en cas de très fort séisme qui pourrait saturer les enregistrements du sismomètre.
- Un récepteur GPS mesure les déplacements lents du sol en continu (sur plusieurs années).
- Les données de ces capteurs sont numérisées sur site puis transmises par satellite via un lien VSAT à l'observatoire. Les systèmes d'acquisition de chaque station intègrent un stockage temporaire *in situ*, permettant de compenser d'éventuelles pertes de données lors de leurs transmissions grâce à un mécanisme logiciel de retransmission.
- Une centrale solaire avec redondance permet d'alimenter ces équipements. Elle a été définie de façon à assurer au maximum la disponibilité du service.

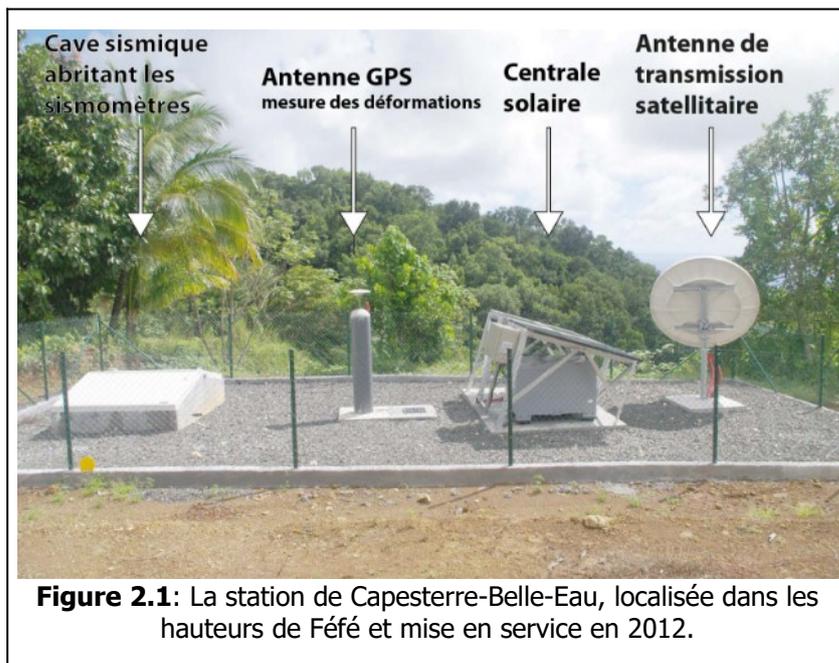
Les deux premières stations sont opérationnelles depuis 2008 à Deshaies, et depuis 2010 à la Désirade. Quatre autres stations sont opérationnelles depuis fin 2012 dans l'archipel de la Guadeloupe : Anse Bertrand, Marie Galante, Terre-de-Bas et Capesterre-Belle-Eau. Enfin la station de St Barthélémy a été installée en 2016.

Les stations de Martinique (OVSM) et de Trinité-et-Tobago (SRC) sont acquises à l'OVSG, et réciproquement, afin d'assurer une redondance en cas de défaillance d'un des trois HUBs.

La maintenance de ces stations est réalisée principalement à distance depuis l'observatoire mais elle nécessite au minimum une visite par an par site afin de s'assurer du bon état des équipements et des infrastructures.

La station de Saint-Barthélémy, très lourdement endommagée par le cyclone Irma en 2017, a été complètement remaniée cette année. Une mission sur quatre jours impliquant 4 personnes OVSG et deux personnes de la collectivité de St-Barthélémy a permis de remonter cette station dans une configuration renforcée, la rendant ainsi beaucoup moins sensible aux cyclones. Cela est notamment passé par l'installation d'un radôme qui abrite aujourd'hui la transmission satellite (antenne et modem), la régulation solaire, les batteries, le récepteur GPS. Les panneaux solaires ont été réinstallés plus proches du sol pour qu'ils soient moins impactés par les vents forts.

Un forage de 20 mètres de profondeur a été réalisé sur la station TDBA (Terre-de-Bas). Le Trillium 120 Posthole de chez Nanometrics (sismomètre étanche de fond de puit) déjà installé dans la cave instrumentale a donc été descendu au fond de ce forage. Cette opération permet de réduire le bruit environnemental auquel est soumis le sismomètre.



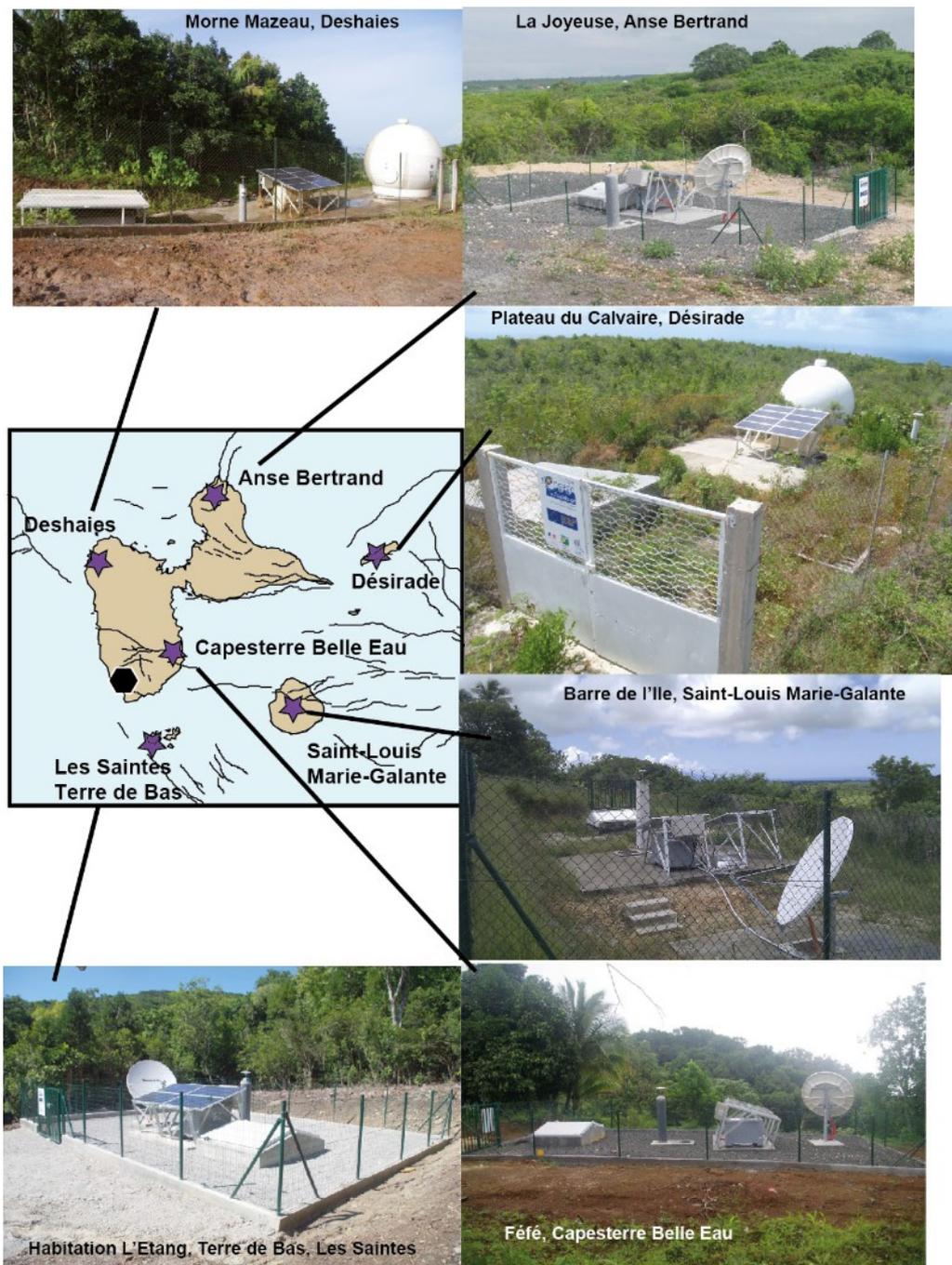


Figure 2.3: Les 6 stations sismologiques et géodésiques du réseau régional installées sur l'archipel guadeloupéen



Figure 2.4: Fin de chantier sur la station nouvelle version de SBLM



Figure 2.5: Station TDBA avec la nouvelle tête de puits au premier plan

Accélérométrie permanente (réseau RAP)

Stations : 19

Interventions : 16

L'objectif de ce réseau est d'enregistrer les mouvements forts du sol et de fournir aux chercheurs et aux ingénieurs des données permettant de comprendre les phénomènes relatifs au mouvement du sol lors de séismes, d'étudier la source des tremblements de terre, et d'améliorer nos connaissances sur la vulnérabilité des ouvrages.

Les 12 premières stations de ce réseau ont été financées par le GIS-RAP, Groupement d'Intérêt Scientifique créé en 2000 sous les tutelles du Ministère de l'Environnement, du Ministère de l'Équipement et du Bureau Central Sismologique Français, et installées entre 2003 et 2004. Pour garder une cohérence nationale et garantir l'accès à la base de données à tous, un centre national est basé à l'Université de Grenoble (www-rap.obs.ujf-grenoble.fr).

À partir de 2004 et grâce au projet CDSA (BRGM, IPGP, UAG), 8 nouvelles stations ont été financées pour compléter la répartition spatiale du réseau accélérométrique ; 7 ont été installées. A ce jour le réseau accélérométrique compte 19 stations qui émettent leurs données via le réseau téléphonique, à la demande du système d'acquisition installé à l'observatoire.

Les stations sont installées dans des bâtiments publics : mairies, écoles, stades... Sauf les stations CDSA à l'observatoire du Houëlmont et BERA au rocher à côté de l'hippodrome d'Anse Bertrand. L'acquisition se fait par déclenchement (rapatriement des données lors d'un événement) grâce à des modem sur des lignes téléphoniques pour 12 stations,

Plusieurs problèmes techniques (dysfonctionnement des numériseurs, des récepteurs GPS, pannes électriques et/ou téléphoniques,...) subsistent, entraînant une maintenance fréquente sur la plupart des stations. Les numériseurs équipant les systèmes d'acquisition de ces stations ne sont plus maintenus par le constructeur. La société qui a développé l'ensemble des modules a cessé son activité en 2011. De ce fait, nous nous trouvons dans l'obligation de nous tourner vers de nouveaux systèmes pour l'acquisition (Nanometrics) et la transmission (ADSL en VPN). Ce sont les évolutions techniques majeures qui vont concerner ce réseau dans les années à venir, si les budgets le permettent.

Actuellement, les stations du Houëlmont (CDSA), Terre-de-Haut (THMA), Marie-Galante (GBGA), Saint-Martin (SMMA), Saint-Barthelemy (SBTA), Préfecture de Basse Terre (PRFA), aérodrome de la Désiarde (ADEA), aérodrome de Baillif (ABFA) disposent de système d'acquisition moderne permettant ne acquisition continu des données.

Grâce à la convention de collaboration avec les instituts qui hébergent nos stations, nous pouvons opter pour la transmission des données via les moyens de communication ethernet câblé ou réseau de communication ethernet sans fil.

C'est le cas pour la station de la Préfecture (PRFA), de la collectivité de Saint Barthélemy (SBTA) et aérodrome de Baillif (ABFA). En 2020 la transmission des données de la station de Baillif a été finalisée.

Dépouillements sismiques et alertes aux séismes

Le sismogramme multivoies (SefraN), entièrement numérique, développé sur ordinateur en 2003 et opérationnel depuis début 2004 reste la clé de voûte de la surveillance des mouvements du sol sur notre territoire et donc de la détection des séismes.

Une mise à jour majeure a vu le jour en 2013 à l'OVSG lors de l'installation du SEFRAN3 : Troisième génération du sismogramme numérique développé par Francois Beauducel ancien directeur de l'OVSG (2001-2007). Une de ses caractéristiques majeures est de prendre ses données sources au format SEEDLINK qui est devenu en quelques années le standard incontournable dans la sismologie pour échanger et archiver des données. Il est entièrement basé

sur des technologies WEB et propose un niveau de zoom supérieur et une saisie semi-automatique afin d'identifier au mieux les événements.

C'est ce nouveau SEFRAN3 qui est exploité en routine quotidiennement, c'est à dire que chaque seconde a été regardée par un agent de l'observatoire.

Pour chaque séisme susceptible de générer des intensités supérieures ou égales à II dans une commune de Guadeloupe, une carte d'intensité produite est calculée. Elle sert de base aux communiqués de l'OVSG en cas de séisme ressenti.

Auto localisation et alerte sismique :

Un système informatique analyse en temps réel les flux de données sismiques reçus à l'OVSG. Il permet la détection d'événement et la localisation de séismes quelques dizaines de secondes après leurs occurrences. Une fois le séisme localisé, le système calcul l'intensité prédite par le modèle B-cube pour chaque commune de Guadeloupe. Si le résultat approche une intensité pouvant être ressentie par la population, une alerte email et SMS est envoyée aux responsables de l'observatoire afin qu'ils puissent rapidement vérifier le résultat et informer les autorités si besoin.

2.2 Réseaux de déformations (Géodésie)

L'apport de nouveau magma vers la surface génère une surpression dans l'édifice volcanique qui induit des déformations mesurables en surface avant une éruption. Ces déformations peuvent engendrer des instabilités du sol qui présentent elles aussi un aléa qu'il faut prévenir. La surveillance du champ de déformations est réalisée par la mesure de déplacements relatifs de repères en surface ou de l'inclinaison du sol. Elle requiert l'intégration de plusieurs techniques offrant des caractéristiques différentes (résolution, dynamique et échantillonnage spatial et temporel).

Les mesures de déformations du sol peuvent également servir à contrôler les déplacements liés à la tectonique locale, autour des failles actives ou à l'échelle de la plaque tectonique elle-même.

Les récepteurs de notre réseau GNSS sont aussi utilisés comme base de référence lors de projets ponctuels portés par des organismes variés (laboratoires de recherche, IGN...)

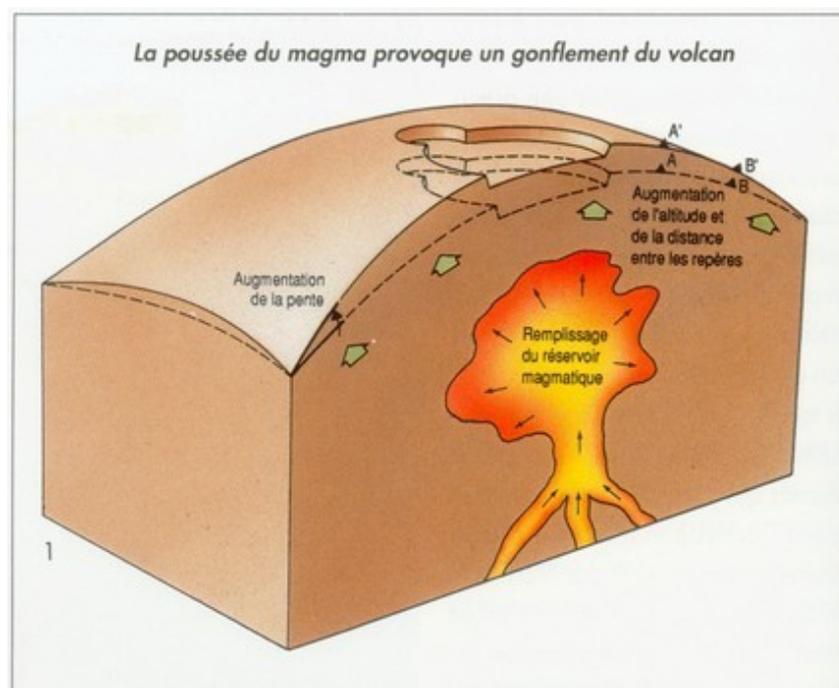


Figure 2.6 Déformation d'un volcan induite par un apport de magma profond

La gravimétrie est la mesure du champ de pesanteur. Les différentes techniques de gravimétrie nous renseignent sur la répartition des masses dans le sous sol ainsi que leurs variations dans temps. Cette discipline utilise principalement deux techniques de mesure : la gravimétrie absolue qui permet d'obtenir une mesure de l'accélération de la pesanteur (le fameux g) en un point donné et la gravimétrie relative, beaucoup plus facile à mettre en œuvre, qui permet de mesurer uniquement les variations du champs de pesanteur.

L'action la plus marquante aboutie en géodésie pour l'année 2019, est la mise en place de la collaboration avec l'IGN-RGP et le Réseau Teria. Dans cette collaboration à présent encadrée par une convention l'OVSG-IPGP met à disposition de Teria des sites de mesures GNSS en échange de quoi ces stations sont référencées dans le RGP et Teria assure la fourniture des équipements de mesure l'installation de cinq GNSS. Les données produites sont diffusées via le réseau Teria (données 1 s et correction RTK), le RGP (données à 30 s), elles sont aussi archivées à l'OVSG-IPGP et distribuées via la plate-forme de diffusion de données VOLOBISIS (données à 30 s).

GNSS (*Global Navigation Satellite System*) permanents

Stations permanentes : 29 dont 3 équipés en 2019 avec Teria (passage du réseau répétition au réseau permanent)

Interventions : 25

Le réseau de GNSS permanent de l'OVSG se divise en deux parties, l'une est dédiée à la surveillance du volcan et le second est dédié à l'étude des mouvements à tectoniques à l'échelle de l'arc des petites Antilles.

Après plusieurs années passées à renforcer le réseau régional dédié à la surveillance et à l'étude des déformations de la plaque Caraïbes les efforts se tournent actuellement vers la soufrière. Notre objectif est de renforcer significativement le nombre de GNSS permanents dédiés à la surveillance du volcan afin d'être en mesure de mesurer les déformations induites par une intrusion de matériel allant de 6 km de profondeur à la surface.

Afin de déterminer au mieux l'étendue et la géométrie du réseau nécessaire, nous avons demandé à nos collègues de l'IPGP de réaliser des modélisations du champ de déformations de la soufrière suite à une arrivée de matériel à différentes profondeurs.

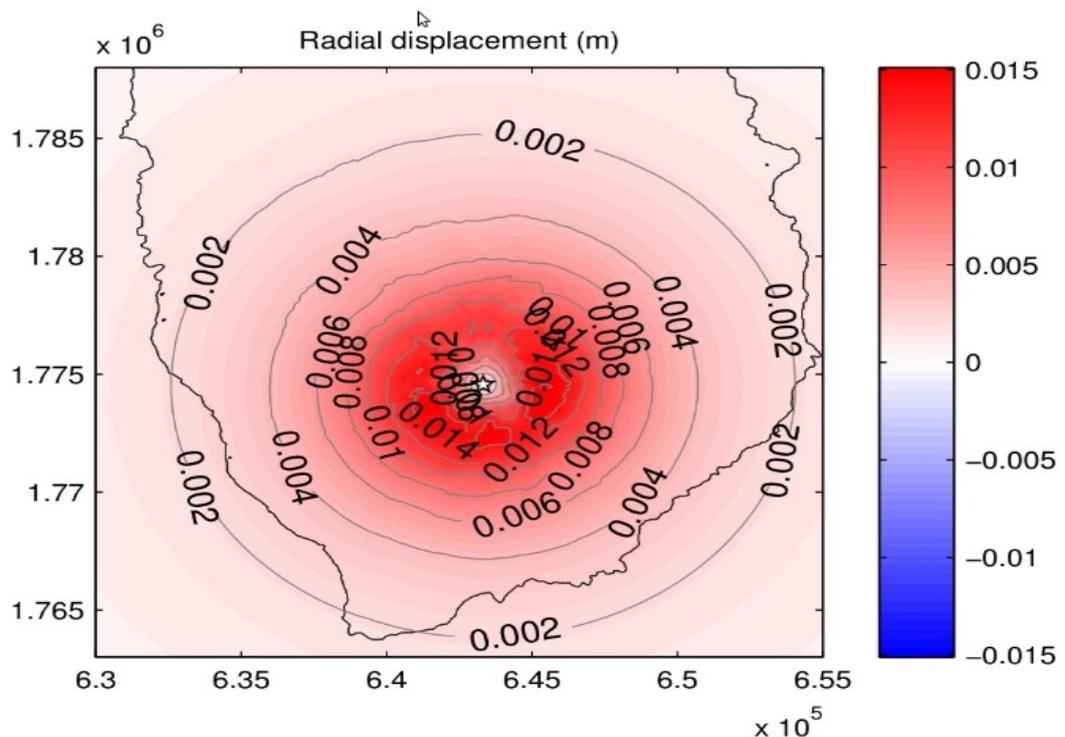


Figure 2.7 Déformation radiale attendue suite à l'intrusion de $1 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ à une profondeur de 3 km sous le dôme de la Soufrière. Le volume du dôme de la soufrière tel qu'il apparaît actuellement est d'environ $100 \cdot 10^6 \text{ m}^3$.

Tenant compte des résultats de ces modélisations, nous avons décidé de doter de trois à quatre GNSS permanents trois couronnes centrées sur le volcan. La plus distale (>6 km du dôme) permettra de détecter une arrivée de matériel à des profondeurs de 6 km et plus ; la couronne intermédiaire (entre 1.5 et 6 km du dôme) est dédiée aux profondeurs intermédiaires et la couronne proximale (<1.5 km du dôme) permettra de surveiller des mouvements à l'échelle du système hydrothermal. Les distances au dôme étant variées, les déformations enregistrées lors

d'un apport de magma devraient permettre de d'estimer les volumes et les profondeurs d'intrusion.

Pour finir les stations situées sur ou à la base du dôme permettent de mieux comprendre le champ de déformation de cette partie de l'édifice. Ces stations devraient permettre la mise en place une alerte basée sur les déformations anormales des flancs de du dôme dans les prochains mois.



Figure 2.8 Carte du réseau de GNSS continus dédié à la surveillance du volcan : En bleu l'existant et en rouge les sites sélectionnés pour compléter le réseau.



Figure 2.9 Construction du monument et installation du récepteur GNSS à STG0 le 1^{er} juin 2018.



Figure 2.10 Carte du réseau de GNSS continu dédié à la surveillance des déformations régionales. Les carrés symbolisent les sites qui ont intégré le réseau Teria en 2020. En bleu l'existant et en vert les sites instrumentés ou ayant bénéficié d'une importante remise en état en 2019.

GNSS (Global Navigation Satellite System) de répétition

Sites : 52 le premier janvier 2021.

Interventions : 58

Le réseau GNSS de répétition comportait 53 sites de mesure au début de la campagne de répétition 2019. Deux sites ont été rajoutés à ce réseau durant cette campagne (BOB2 le 13 mars 2019 et BSOL le 18 mars 2019) et 3 sites ont quittés ce réseau un peu plus tard en 2019 pour intégrer le réseau GNSS continu (ASF DESH et LDIS).

La campagne de mesure 2020 a été organisée par Jean-Bernard de Chabalier (IPGP-Paris) avec une aide financière du projet INTERREG PREST. Durant cette mission, 29 sites ont été mesurés durant une durée minimum de 2 jours complets, impliquant l'utilisation de batteries et panneaux solaires. La campagne a été écourtée du fait du confinement du aux mesures sanitaires liées à la crise du COVID-19.

Gravimétrie

Gravimétrie absolue :

Sites : 4 dont deux mis en place en 2019

Interventions : 0

De nombreuses campagnes de mesures sont effectuées sur le dôme de la soufrière et ses environ afin de mieux surveiller et comprendre la structure du volcan.

Il est souvent utile de caler géographiquement ces mesures sur un site dont la position peut être déterminée avec précision par plusieurs techniques de mesures indépendantes.

Au premier trimestre 2014 nous avons construit une dalle cubique de 1 mètre de coté coulée dans le sol et équipée d'un repère en bronze situé au centre de la face supérieure. Ce repère pérenne a été intégré comme « repère de nivellement » au réseau de nivellement français par l'IGN sous le matricule B. EL-26-I. Il a été nivelé avec 6 repères voisins situés le long de la route de la citerne lors de la mission de gravimétrie. La portion de route nivelée en 2014 débute sous le piton Tarade, est centrée sur la dalle géodésique, et se termine après la faille de la Ty. Des variations d'altitudes faibles (<6 mm) ont été mesurées entre la précédente détermination (1988) et celle effectuée en 2014.

Les fiches mises à jour de ces repères sont accessibles sur le portail web de l'IGN (<http://http://geodesie.ign.fr/fiches/index.php?module=e&action=visugeod>)



Figure 2.11 Mesures de gravimétrie absolue effectuée sur la dalle géodésique de savane à Mulets en 2014

En mai 2014 nous avons réalisé une campagne de mesure de gravimétrie absolue en partenariat avec l'IGN sur le même principe d'échange de moyens et de compétences qui ont rendu possible les mesures réalisées en 2013. Les mesures de 2011 ont été financées par l'ANR DOMOSCAN. En 2014 nous avons réalisé les mesures absolue sur la base de géodésie réalisée en début d'année.

Ce site bien plus pérenne que l'ancien clou d'arpenteur planté dans le bitume utilisé en 2011 et 2013 nous assure de pouvoir réaliser des mesures comparables à moyen voire long terme.

Le rattachement entre l'ancien site de mesures (clou d'arpenteur) et le nouveau site, rendant la comparaison des mesures effectuées entre 2011 et 2014 possible a été réalisé à l'aide d'un gravimètre relatif dans le cadre de la campagne de mesure de gravimétrie relative réalisée en 2014 et financée par l'INSU (voir paragraphe suivant).

En mai 2019 toujours à la faveur d'une collaboration avec l'IGN nous avons effectué trois mesures de gravimétrie absolue sur le terrain : la première a été réalisée sur la dale géodésique de Savane à Mulets. Les résultats préliminaires montrent une variation positive d'environ $18\mu\text{gal}$ qui peu être interprété comme un affaissement d'environ 6 cm (qui n'a pas été remarqué sur le terrain) et correspond aussi à une augmentation du niveau d'un plan d'eau homogène de 42 cm.

Ligne d'étalonnage pour gravimètres relatifs

Le projet ANR MegaMu qui a débuté début 2020 comprends l'installation d'un gravimètre relatif au sommet de la Soufrière. L'appareil utilisé nécessite d'être calibré à intervalle de temps régulier. Pour effectuer cette calibration, il faut effectuer des mesure sur une ligne d'étalonnage ou les variations de pesanteur sont connues et supposées constante. La ligne d'étalonnage historique, utilisée lors des mesures de 2001, ayant été détruite nous en avons construit une nouvelle. Elle est constituée de deux sites de mesure matérialisés par des repères géodésiques en laiton. Le premier est situés devant le commissariat de police de Pointe Noire et le second est situé à proximité du point de vue de Morne à Louis. Les mesures absolues effectuées cette année sur ces sites permettront de réaliser la calibration des gravimètres absolus amenés en Guadeloupe.



Figure 2.12a *Mesure de gravimétrie relative au sommet du dôme. L'antenne GNSS est placée sur le gravimètre à l'aide d'un support réalisé conçu spécialement pour ce lever.*

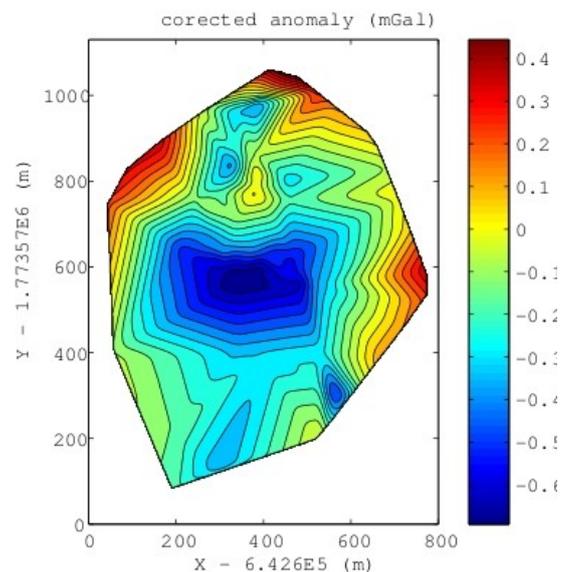


Figure 2.13b *Une fois retiré les effets d'altitude, de marée, de dérive instrumentale et dus à la topographie environnante, les variations de pesanteur reflètent les variations de densité du sol.*

Campagne de gravimétrie relative dédiée à l'étude de la structure du dôme :

Une fois retiré les effets dus aux marées et à la topographie, l'étude des variations de la pesanteur sur le dôme nous renseigne sur la répartition des masses dans le sous sol. Le projet I« *Tomographie combiné de la Soufrière par radiographie muons et gravimétrie* » (*appel d'offres de l'INSU 2014 (CT3-Aleas)*) porté par Dominique Gibert et dont l'OVSG est partenaire a permis de réaliser un lever de gravimétrie relative sur le dôme. Le traitement des données de gravimétrie à l'échelle du dôme nécessitent un positionnement très précis (centimétrique) des sites de mesures. L'acquisition des données de gravimétrie et leur positionnement par GNSS différentiel demandent beaucoup de temps. Afin d'optimiser l'acquisition des mesures nous avons conçu un support d'antenne GNSS qui se fixe directement sur le gravimètre. Cet outil permet un positionnement plus précis que les méthodes classiques (installation d'un repère lors de la mesure de gravimétrie puis utilisation d'un trépied de géodésie pour le positionnement) et permettent d'effectuer en même temps les mesure de positionnement et de gravimétrie. Cet outil est aussi beaucoup plus léger et moins encombrant que le matériel de positionnement classique

Les premiers résultats obtenus ont permis de dresser une carte d'anomalie gravimétriques sur le dôme qui nous renseignent sur les variations de densité et éventuelles cavités qui se trouvent dans le dôme. La mise au point des techniques d'interprétation combinées gravimétrie-muons a été présentée lors de la soutenance de thèse de Kevin Jourdes (ANR DIAPHANE) fin 2015. Par ailleurs une présentation la comparaison des premiers résultats issus de la gravimétrie avec des résultats de tomographie électrique issus d'une compilation des données acquise ces dernière années a été présentée lors de la dernière réunion de l'*American Geophysical Union* qui a eu lieu à San Francisco en décembre 2015. (3-D Resistivity Structure of La Soufrière Volcano (Guadeloupe) : New Insights into the Hydrothermal System and Associated Hazards. M Rosas-Carbajal, F Nicollin, JC Komorowski, D Gibert, S Deroussi. AGU Fall Meeting 2015, V12B-06 (*oral*))

Gravimétrie relative :

Sites : 32

Mesures : 0

Les premières mesures de micro-gravimétrie relatives dédiées à l'étude temporelle du volcan ont été réalisées en 1985. Ce réseau a été répété pour la dernière fois en 2001, l'analyse des résultats n'a pas montré de variations significatives entre 1985 et 2001. Il est souhaitable de réoccuper et de moderniser ce réseau de mesures en nous appuyant sur le réseau de répétition GNSS qui est plus dense et bien matérialisé.

Extensométrie / fissurométrie

Sites : 17

Mesures : 7 campagnes

Le réseau d'extensométrie longue base et de fissurométrie 3D de la Soufrière a été mis en place pour la surveillance des déplacements de faible et moyenne amplitude sur les fractures et failles principales du dôme. L'utilisation d'un extensomètre DGSI (*Durham Geo Slope Indicator*) permet la mesure des ouvertures ou fermetures sur des fractures de 3 à 20 m de large avec une précision d'environ 0.2 mm. La mesure des déplacements 3D est quant à elle effectuée par des palmers ou pied à coulisse, ce qui limite à des fissures de 15 à 20 cm de largeur, mais avec une précision d'environ 0.02 mm. Ce réseau mesure l'écartement des fractures sur une vingtaine de sites sur le dôme et les mesures sont réitérées manuellement environ tous les 3 mois, lorsque les conditions météorologiques sont favorables.



Figure 2.14 Mesure d'extensométrie, faille du Nord-ouest, octobre 2013.

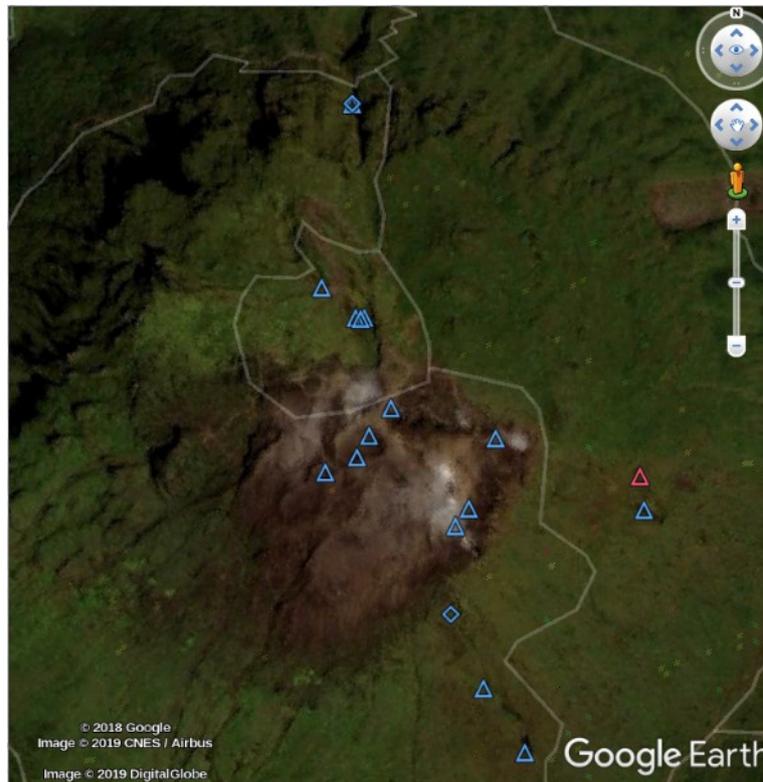


Figure 2.15 Réseau de mesure d'extensométrie (triangles) et de fissurométrie (losanges). En rouge le site équipé en le 9 février 2018.

Extensomètre radar :

Depuis décembre 2015 un capteur permet la surveillance automatique de la partie basse de la Faille du 30 août. Ce radar est solidement ancré dans la paroi d'un côté de la faille et mesure la distance qui le sépare d'un cône métallique, qui sert de réflecteur, fixé de l'autre côté. La mesure de distance est transmise à un boîtier PC FOX qui permet de créer un flux de données miniseed, compatible avec notre système d'acquisition sismologique. La transition est réalisée grâce à un lien WIFI. Une page de webobs permet de suivre en direct les résultats de mesure.

Cet instrument est à l'heure actuelle en phase de tests. Après des séries de mesures effectuées avec un réflecteur en coin de cube acier de 20 cm de côté, nous avons réalisé des mesures directement sur la roche avant d'installer un réflecteur de grande taille (60 cm) en mars 2018.



Figure 2.16 Capteur (gauche) et cône réflecteur (droite) pour la mesure d'extensométrie Radar, faille du 30 Août

Marégraphes

Sites : 2

Interventions : 3 (2 à Deshaies + 1 à la Désirade)

Au cours des années 2000, les craintes suscitées par une éventuelle déstabilisation de flanc qui aurait pu se produire à Montserrat et engendrer un tsunami sur les cotes de la Guadeloupe ont conduit l'OVSG, en partenariat avec le conseil général de la Guadeloupe, à installer une première série de 4 marégraphes le long de la côte sous le vent. Ces instruments étaient destinés à 1) Contraindre les modèles de genèse de tsunami, en reliant les hauteurs de vagues mesurées aux paramètres de la source (volume de matériaux et vitesse d'immersion, par exemple à Montserrat) ; 2) Estimer la variabilité de l'aléa tsunami en Guadeloupe, en identifiant les zones côtières à effet de sites ; 3) Obtenir des données objectives pour les services de la Préfecture en cas de dégâts. Trois de ces instruments ont été détruits par les houles cycloniques et celui de Deshaies a été ensablé lors d'un épisode de fortes pluies en novembre 2011.

Suivant les recommandations du Groupe de Coordination International (GCI) de l'IOC-UNESCO pour la mise en place du système d'alerte aux tsunamis dans les Caraïbes, l'OVSG a installé deux marégraphes situés à la Désirade (2010) et à Deshaies (installation en 2012, données disponibles pour l'alerte depuis le 7 juin 2013). Ces marégraphes ont été financés par le programme CPER-PO (Europe, Conseil Général de la Guadeloupe, Ministère de l'écologie, Ministère de la recherche et l'IPGP). Les choix technologiques ont été faits en suivant les conseils du Service Hydrographique de la Marine (SHOM, en charge du réseau de marégraphes français et opérateur des marégraphes de Pointe-à-Pitre) et sont en accord avec les recommandations du GCI. Ainsi, les capteurs et moyens de transmission des données ont été choisis pour répondre aux exigences du

centre d'alerte aux tsunamis mais aussi pour fournir des données qui pourront être utilisées dans des travaux de recherche dans les domaines de la détermination du niveau moyen des océans, la dynamique océanique, les mouvements verticaux de la croûte terrestre ou l'amélioration des modèles de marée. Le marégraphe de Deshaies a été contrôlé en décembre dernier en collaboration avec des collègues du SHOM de passage en Guadeloupe.

Les données de ces marégraphes sont accessibles en ligne aux adresses suivantes :

La Désirade : <http://www.ioc-sealevelmonitoring.org/station.php?code=desi>

Deshaies : <http://www.ioc-sealevelmonitoring.org/station.php?code=desh>

L'installation de ces deux marégraphes s'inscrit aussi dans une dynamique régionale qui implique notamment le Conseil Général de la Martinique et le SHOM qui sont les deux autres opérateurs de marégraphes dédiés à l'alerte aux tsunamis dans les Antilles françaises, mais aussi l'observatoire de la Martinique (Valérie Clouard est point de contact national du GIC/CARIBE-EWS pour les tsunamis) et l'état-major interministériel de zone Antilles (Patric Tyburn conseiller en matière de tsunamis). Ces derniers travaillent, entre autres, à la mise en place de l'alerte descendante, destinée à alerter la population en cas de tsunamis.

Lors de l'édition 2015 de la réunion du groupe de coordination international de l'IOC-UNESCO pour la mise en place du système d'alerte aux tsunamis dans les Caraïbes, la collectivité de Saint Martin a fait par de son projet d'installation d'un marégraphe dédié à l'alerte aux tsunamis sur son territoire. L'OVSG a joué un rôle d'expert et conseiller technique lors du montage du projet puis a participé l'installation. Les données de ce marégraphe participent à l'alerte aux tsunamis dans les caraïbes depuis le 29 décembre 2015. Lors du passage du cyclone IRMA le marégraphe a cessé d'émettre les données en temps réel pendant quelques dizaines d'heures avant de reprendre son fonctionnement.

L'OVSG a aussi joué ce rôle d'expert et conseiller technique pour la réalisation du marégraphe de Grand Turk qui a été installé le 15 juillet 2017.

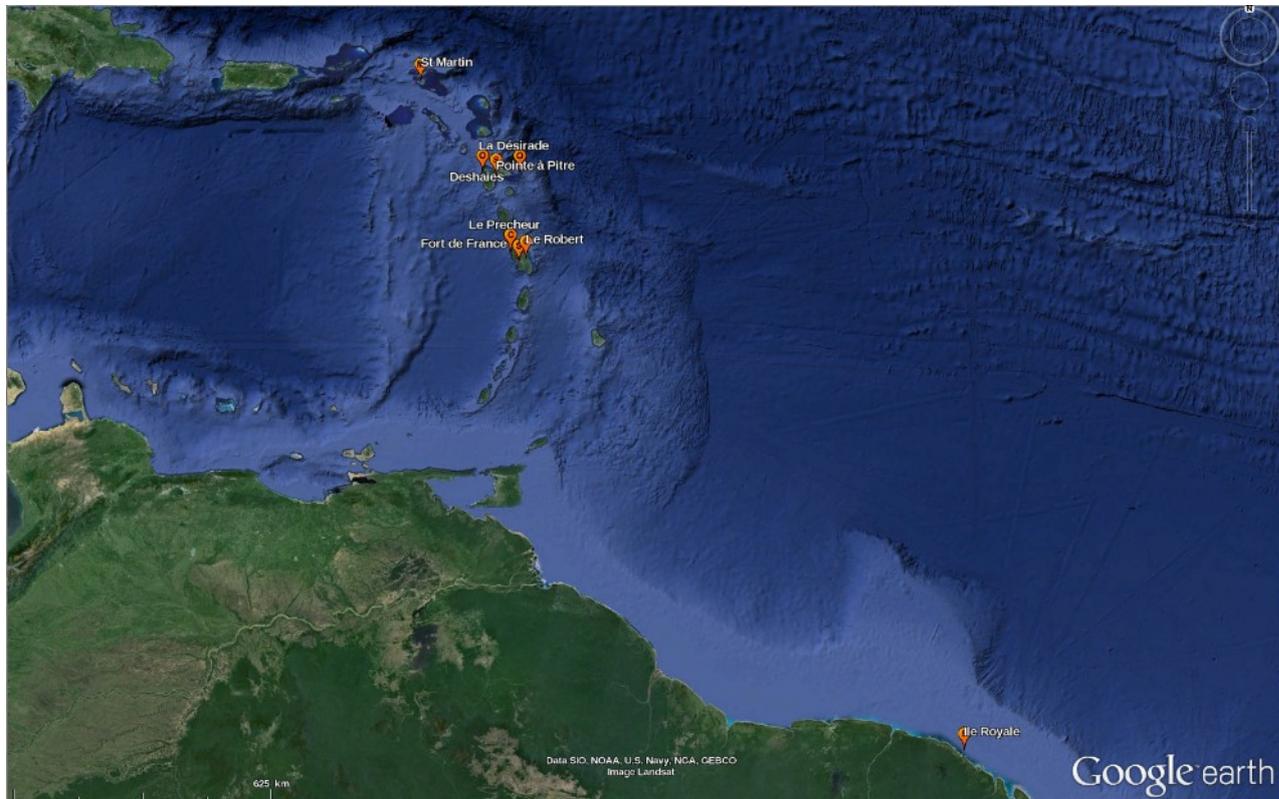


Figure 2.17 Le réseau de français de marégraphes participant à l'alerte aux tsunamis dans les caraïbes.

En juillet 2019 nous avons installé un GNSS continu sur le toit de chaque marégraphe (voir paragraphe GNSS permanents).

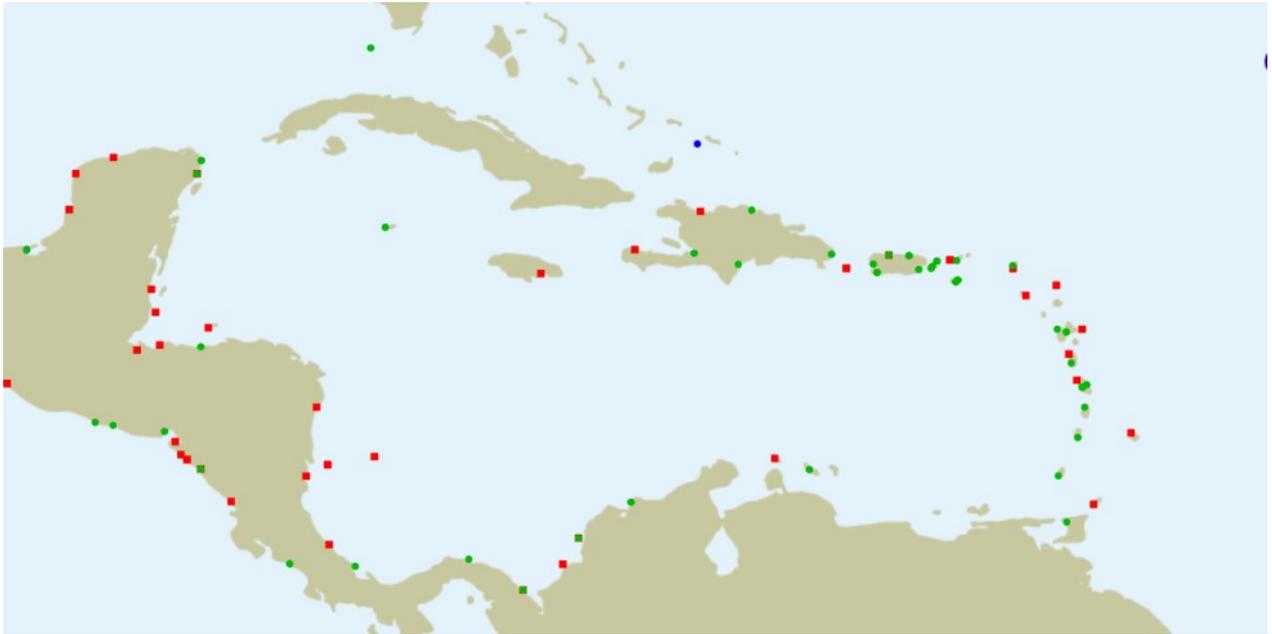


Figure 2.18 Carte du réseau de marégraphes dédiés à l’alerte aux tsunamis dans les caraïbes (24 février 2021). En vert les marégraphes contribuant à l’alerte, en rouge les sites hors service. De nombreux marégraphes du nord et de l’est des Antilles ont été mis hors service par les cyclones Irma et Maria en septembre 2017 et n’ont pas été remis en service depuis.

2.3 Réseaux géochimiques

Sur un volcan actif, l’interaction entre les gaz magmatiques émanant à haute température du réservoir profond, les nappes phréatiques, et les roches encaissantes conduit à la formation d’un système hydrothermal qui se manifeste en surface par la présence de sources thermo-minérales, de fumerolles, et de zones d’altération chimique des roches, d’anomalies thermiques, et de zones de dégazage diffus dans le sous-sol, ainsi que par des circulations complexes de fluides à l’intérieur de l’édifice volcanique.

Le suivi de l’évolution physico-chimique du système hydrothermal permet de mieux comprendre les processus relatifs au dégazage profond du magma, à sa remontée vers la surface avant une éruption, ainsi que sur les processus plus superficiels de circulation des fluides dans l’édifice qui traduisent des modifications locales du milieu (géométrie, abondance, dimensions des fractures, colmatage mécanique et/ou chimique, pluviométrie).

La surveillance géochimique intégrée se fait par le biais de mesures et de prélèvements de gaz, eaux, et solides (roches altérées, minéraux fumerolliens) suivie de différentes analyses en laboratoire permettant le dosage des différentes espèces chimiques.

Géochimie des gaz fumerolliens

2 sites fumerolliens prélevés régulièrement via la technique des bouteilles de Giggenbach : 8 prélèvements à CSC, 2 prélèvements à CSN et 5 prélèvements à NapN en 2020

4 sites fumerolliens prélevés régulièrement, sous forme de condensats : G56 (4 fois), CSC (8 fois), CTAS (1 fois) et CNapN (5 fois) en 2020

13 sites fumerolliens analysés régulièrement à l'aide d'un multigaz portable (11 sorties en 2020)

Un lac acide prélevé régulièrement (7 fois en 2020)

Chaque sortie nécessite la présence d'au minimum 2 personnes (3 pour les sorties avec prélèvement par les bouteilles de Giggenbach et condensats)

Lorsqu'un magma pénètre dans les niveaux superficiels de la Terre, les relations avec son encaissant deviennent très différentes de celles qui prévalaient à plus grande profondeur. Ce nouveau régime est lié à la baisse progressive de la pression et de la température, et à la rencontre possible avec des fluides superficiels, l'eau en particulier. Ces conditions nouvelles vont provoquer une vésiculation et un dégazage du magma, en même temps qu'une cristallisation.

Les solubilités des différents gaz n'étant pas toutes les mêmes, la dépressurisation et la baisse de température entraînent un dégazage différentiel donc, lors des phases éruptives, une variation de la composition chimique. L'analyse chimique des gaz fumerolliens renseigne alors sur l'évolution du processus éruptif.

La fumerolle principale au sommet de la soufrière, appelée Cratère Sud Centre (CSC), fait l'objet d'un suivi tout particulier, du fait de son débit important et de son accessibilité qui rendent son prélèvement à l'aide des bouteilles de Giggenbach possible. De temps en temps, l'augmentation du débit de cette fumerolle rend son prélèvement impossible. Lorsque cela arrive, un essai de prélèvement de la fumerolle du Cratère Sud Nord (CSN) est tenté.

Un autre site est prélevé via les bouteilles de Giggenbach ; il s'agit de la fumerolle de Napoléon Nord (NapN).

Des condensats sont recueillis sur plusieurs sites (CSC, G56, TAS et NapN).

Un lac acide (Tarissan) est également prélevé régulièrement. La baisse du niveau de ce lac fin 2020 a rendu son prélèvement difficile voire impossible. Un nouveau système devra être pensé courant 2021.



Figure 2.19a Zone fumerollienne Cratère Sud Centre – 10/04/2020



Figure 2.19b Prélèvement d'une ampoule à soude à CSC – 27/02/2020



Figure 2.20 Prélèvement d'une ampoule à soude et d'un condensat-saladier à NapN – 05/08/2020

Les techniques de prélèvement ont été optimisées suite à l'arrivée de Roberto Moretti à l'OVSG fin 2017. Ces optimisations sont encore en cours et se font de façon collaborative entre les services de géochimie et les services de développement / instrumentation de l'observatoire. En 2020 a été conçu un système de refroidissement des gaz afin de favoriser leurs condensations. Ce dispositif est opérationnel depuis la fin de l'année et fait l'objet de test. Un système de maintien en température des gaz a été pensé afin de déporter le prélèvement des fumerolles (cela permet d'améliorer significativement les conditions de travail). Ce système fera l'objet de test début 2021.

Les échantillons prélevés sont ensuite analysés par titration acidobasique (Metrohm 916 Ti-Touch), par chromatographie ionique (système Aquion de chez Thermo Scientific) et par spectrométrie de masse (Pfeiffer Vacuum OmniStar) avant d'être envoyés aux équipes parisiennes pour des analyses plus fines (isotopiques notamment).

En 2016, l'OVSG, sur crédits CNRS, s'est équipé d'un nouveau spectromètre de masse qui remplace celui qui était en place depuis 2002 et qui était tombé en panne courant 2015.

En 2018, l'appareil de chromatographie ionique a été à de nombreuses reprises en panne. Cela a demandé beaucoup de temps de maintenance. Fin 2018, il a définitivement rendu l'âme. Un nouvel équipement a été acheté et installé début 2019.

Les données de terrain (température, débit approximatif) ainsi que les résultats des analyses effectuées en laboratoire (pH, proportion des gaz des fumerolles, proportion des différents gaz) sont intégrées à la base de données de l'OVSG.

Multigaz portable

Un MultiGAS (Multi-component Gas Analysing System) portable a été financé via l'obtention d'un projet INSU (AO Aléas-2014 ; PI : Moune ; C. Dessert, V. Robert, T. Kitou, A. Di Muro, P. Allard, P. Agrinier) « Investigation of the hydrothermal system of La Soufrière volcano, Guadeloupe ».

Ce MultiGAS est disponible à l'OVSG depuis 2016. Il mesure, via des capteurs électrochimiques et infrarouges, les gaz (CO_2 , H_2S , SO_2 , H_2) des panaches dilués dans le but d'observer les changements temporels des rapports de compositions (p.e. $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{S}$, $\text{SO}_2/\text{H}_2\text{S}$) et flux de gaz de la Soufrière de Guadeloupe. La particularité et l'avantage du MultiGAS est de pouvoir faire des mesures de gaz au niveau de tous les sites fumerolliens et/ou zones de dégazage diffus (contrairement aux bouteilles qui nécessitent un flux de gaz important). Ainsi, cela permet d'avoir une cartographie de la géochimie des gaz sur l'ensemble du volcan.

Depuis Mai 2016, des mesures régulières sont effectuées autour et sur le dôme de La Soufrière. En 2020, 11 sorties ont été effectuées prélevant 13 différents sites (axe SSE vers NNO : gouffre Breislack, Gouffre 56, fracture Lacroix, Cratère Sud Centre, Nord et Sud, Tarissan, Napoléon nord, NF1, NF2, NF3 mais aussi les zones de dégazage diffus dans la zone entre NF1 et Tarissan/Dupuy, Faille de la Ty,...). Des reconnaissances de zones mentionnées par des guides ou touristes comme nouvellement affectées par le dégazage (dégazage diffus et/ou végétations brûlées observés) ont été effectués (sur chemin des Dames, dans la Fente du Nord).

En plus des mesures de compositions, des mesures de flux sont effectuées au niveau des événements les plus importants et qui génèrent donc des panaches. En 2020, 15 flux ont été mesurés pour Cratère Sud, Tarissan et Gouffre 56 lors de traverses, à différentes hauteurs, sous les panaches avec le MultiGAS. Ces données à différentes hauteurs nous permettent de calculer des concentrations intégrées sur une colonne du panache (ICA), qui multipliée par la vitesse du vent, nous permet d'obtenir les flux de gaz.

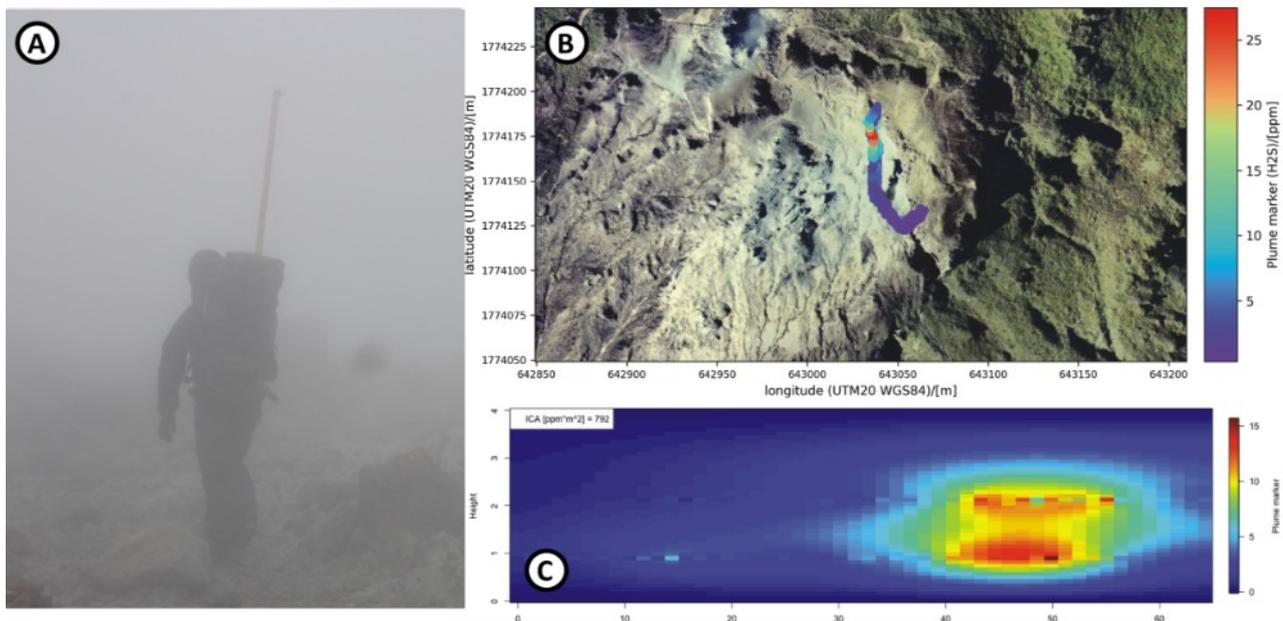


Figure 2.21 A – Mesure des concentrations des gaz volcaniques en marchant pendant 15 min sous le panache avec un MultiGAS portable. (photo J-C Komorowski). B – Concentrations en H_2S dans le panache de Cratère Sud lors d'une traverse (20-07-2018) sur une carte topographique montrant le chemin parcouru sous le panache. C – Coupe transversale du panache montrant la concentration intégrée en H_2S de la colonne du panache le long du chemin parcouru en mesurant le panache à différentes hauteurs.

Les données montrent une variabilité des rapports de concentrations et une diminution des flux. La variabilité des rapports peut s'expliquer non seulement par des forçages internes (p.e

apports de chaleur provenant des gaz profonds) mais aussi par des forçages externes (pluie, variation du niveau de la nappe, vent....., Moune et al., in prep.). Les données MultiGAS sont également comparés aux données des bouteilles, nous permettant de mieux contraindre l'effet de l'interaction entre des gaz sortant à ~ 100 °C et l'air ambiant sur la chimie de ces composés.

Réseau de multigaz permanents

En collaboration avec Giancarlo Tamburello (INGV, Italie), 3 stations multigaz ont été installés fin 2016, début 2017 sur les sites des fumerolles du Cratère Sud Sud, du Gouffre 56 inférieur et du Tarissan. Ces stations permettent d'analyser 3 fumerolles 4 fois par jour. Les gaz CO₂, H₂S et CO₂ ainsi que l'humidité relative de chaque fumerolle sont mesurées, enregistrées dans un datalogger (CR6 de chez Campbell Scientific) et envoyées par wifi à l'observatoire.

Les conditions météorologiques difficiles ainsi que le passage du cyclone Maria en septembre 2017 a engendré la panne des 3 stations permanentes (Gouffre 56 : Sept.2017, Cratère Sud Sud : Aout 2017, Tarissan : Juillet 2017). Fin 2017, 2 stations ont été re-installées. Cependant, elles sont de nouveau tombées en panne en Janvier et mi-Mars 2018 pour la station Gouffre 56 et celle de Cratère Sud Sud, respectivement. En 2019, de nombreuses améliorations ont été effectuées afin d'optimiser les stations MultiGAS à l'environnement hostile de La Soufrière (boitier plus étanche, design alléger, connexions plus robustes, composants de rechanges disponibles, etc.). Ces nombreuses améliorations ont permis des re-installations de stations, que ce soit à CS (14/03/2019-30/04/2019) qui fut un résultat peu probant sur la durée, mais surtout à G56 où les conditions de dégazage sont plus propices au fonctionnement durable de l'appareil et dont il a été démontré que la composition des gaz est la moins affectée par le système hydrothermal (Installé à G56 le 21/07/2020). Cette station marche toujours à l'heure actuelle. Des cross-calibrations sont effectuées entre cette station permanente et le multigaz portable de l'observatoire lors de chaque tournée des fumerolles. En parallèle, des MultiGAS « home made OVSG » ont été installés pour test en Sept-Nov. 2020. Les données sont en cours d'analyse (AO IPGP, PI : Moretti).

De plus, en 2019-2020, nous avons amélioré le traitement des données MultiGAS en prenant en compte les réponses des capteurs (Moune et al., in prep.) et avons développé une routine informatique pour traiter ces données en temps réel. A présent, que ce soit les données MG portable ou celles des stations permanentes, nous pouvons visualiser sur Webobs les variations des concentrations des diverses espèces chimiques, des paramètres physico-chimiques (p.e. Rh, T, P) ainsi que des rapports de concentrations CO₂/H₂S et SO₂/H₂S qui sont cruciaux pour suivre l'activité volcanique.

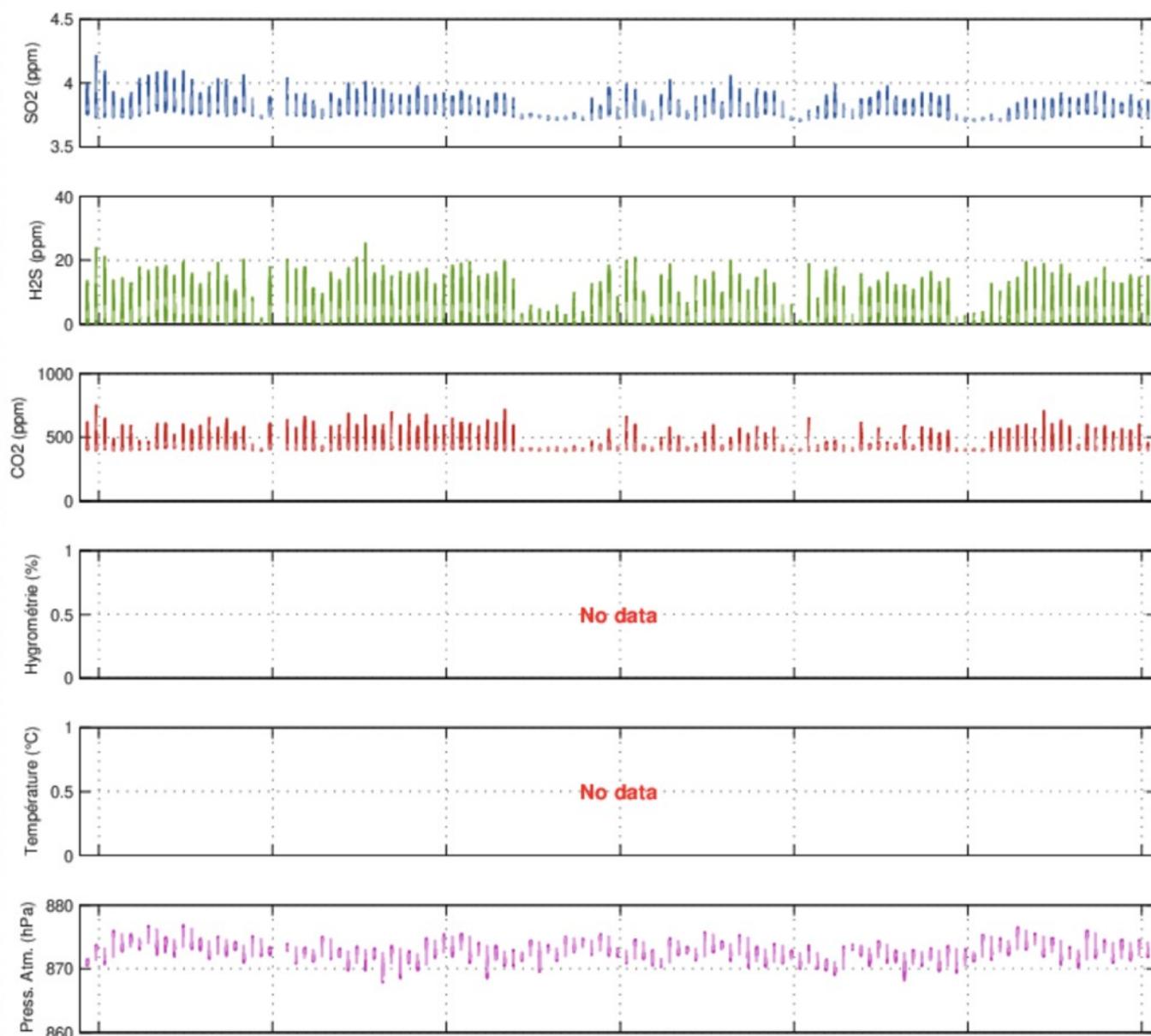


Figure 2.22 Mise à disposition des données MultiGAS de la station permanente G56 mise en place depuis 21/07/20 et qui fonctionne toujours à l'heure actuelle. Disponible sur WebObs.

Géochimie des sources hydrothermales

15 sites échantillonnés en 21 sorties en 2020 ; chaque sortie nécessite 2 personnes

10 sites équipés pour la mesure en continu de la température, 1 station pour la mesure en continu de la conductivité

Le massif volcanique de la Soufrière constitue un relief donnant naissance à des précipitations abondantes (entre 6 et 8 mètres de pluies annuelles). Les eaux météoriques s'infiltrent facilement dans les roches volcaniques et alimentent les nappes phréatiques qui jouent le rôle d'intégrateur dans les processus de transfert d'éléments résultant de l'activité du volcan (CO_2 , SO_2 , H_2S , HCl ,

halogénures alcalins...). Ces éléments traversent les nappes phréatiques, véritables couvercles de l'édifice, et passent en partie en solution.

Les modifications de la composition chimique des sources issues de ces nappes phréatiques constituent des indicateurs dont l'étude permet de suivre l'évolution de l'activité du volcan. La surveillance hydro-géochimique repose sur les mesures de paramètres physico-chimiques mesurés in situ (pH, température, conductivité, oxygène dissous, potentiel rédox, débit), ainsi que sur les analyses chimiques d'un échantillonnage régulier de sources sélectionnées.

Quinze sources thermales sont échantillonnées tous les trois mois puis analysées en laboratoire.

Une aliquote des échantillons est expédiée en métropole pour des analyses plus poussées.



Figure 2.23a Sondes de température au niveau de la source Ravine Marchand 2 – 22/05/2020



Figure 2.23b Prélèvement de la source Ravine Marchand 2 – 22/05/2020

> En 2005, une première station automatique a été installée à la source du Galion. Cette station expérimentale, financée par un projet du Ministère de l'Outre-Mer, a permis l'acquisition durant plusieurs années de mesure en continu de débit, de température et de conductivité de la source toutes les 10 minutes, avec une transmission radio vers l'observatoire.

En 2018, cette station a été rééquipée avec des capteurs neufs (2 sondes de température type Pt100 pour la mesure de la température de l'air et de l'eau ; une sonde de conductivité CTZN) et une acquisition nouvelle, type CR6, de chez Campbell Scientific, avec transmission wifi vers l'observatoire (via un relai avec l'abri du Galion). Des problèmes d'encrassement de la sonde de conductivité ont été observés courant 2020 et nous avons été obligés d'enlever ce capteur. Des soucis d'acquisition

de la mesure du débit sont également apparus en 2020 et des travaux sur celle-ci seront effectués début 2021.

> En 2019, plusieurs capteurs ont été installés à la source Tarade (2 sondes de température type Pt100 pour la mesure de la température de l'air et de l'eau ; une sonde de conductivité CS547A-L). Une centrale d'acquisition type CR6 de chez Campbell Scientific permet la récupération des données et leurs transmissions en wifi à l'observatoire.

Fin 2019, un bassin a été créé à la source Tarade. Il a été terminé début 2020. Il est équipé d'un canal Venturi qui permet la mesure en continu du débit de cette source. Ces mesures ont fait l'objet de nombreux tests courant de cette année.

> Les sources ont continué à être équipées en 2020 par des sondes de température qui permettent d'avoir des séries temporelles avec un pas d'échantillonnage de 10 minutes.

2 types de sondes existent :

- les sondes Seabird SBE56 (les sources TA et RM3 en sont équipées)
- les sondes Tinytag Aquatic2 (les sources TA, BJ Supérieur, GAB, GA, CC, CE, RM3, RM2, RGO1 et RGO2 en sont équipées)



Figure 2.24 Localisation des principales sources hydrothermales suivies par l'OVSG – IPGP en 2020 – Image Google Earth

Plusieurs projets d'amélioration ont vu le jour en 2020. Les échantillons qui le nécessitent sont désormais acidifiés sur le terrain (cations et traces). Un échantillon est systématiquement prélevé pour l'analyse des isotopes de l'eau. Enfin, la mesure de l'alcalinité est désormais faite sur le terrain par titration colorimétrique. En 2021, les objectifs sont de valider les mesures de débit à la source Tarade et à la source Galion, de renforcer l'énergie de ces mêmes stations et de poursuivre les campagnes de mesure des gaz dissous (collaboration avec Géosciences Rennes).

Préparation des échantillonnages, analyses en laboratoire et traitement des données

Un certain nombre de tâches sont effectuées dans les laboratoires de l'OVSG avant et après les échantillonnages de gaz, de condensats, de sources et les mesures in-situ de gaz :

- La préparation du matériel pour le prélèvement des gaz (2 jour/mois) consiste à préparer toutes les ampoules sous vide (ampoules contenant du P_2O_5 , de la soude ou totalement vide en fonction des espèces chimiques analysées).
- La calibration des équipements (spectromètre de masse, multigaz) à l'aide de gaz étalons (8 jours/an).
- L'analyse des gaz par spectromètre de masse quadrupolaire (1 jour/mois).
- Le traitement des données acquises par le multigaz sur le terrain (1 jour/mois).
- L'analyse chimique des sources hydrothermales par chromatographie ionique et titration acido/basique (10 jours tous les 3 mois).

2.4 Réseaux érosion

La surface de la Terre peut être considérée comme un réacteur complexe évoluant sous l'effet de processus physiques, chimiques, hydrologiques, géologiques, climatiques, biologiques et anthropiques mettant en jeu une très large gamme d'échelles de temps et d'espace depuis le mètre et la seconde jusqu'au millier de kilomètres et au million d'années.

Sous l'effet d'une pression anthropique croissante et d'un changement sans précédent de la composition chimique de l'atmosphère, la surface de notre planète est en train d'évoluer considérablement. **L'observation sur le long terme de l'évolution de bassins versants instrumentés est un élément clef pour comprendre les mécanismes complexes qui contrôlent la dynamique de la surface de la Terre afin d'anticiper les changements à venir et de mettre au point des stratégies de gestion.**

Les zones tropicales, caractérisées par des régimes hydrologiques très irréguliers dans lesquels les événements climatiques extrêmes jouent un rôle important, sont particulièrement sensibles à toute modification environnementale : changement climatique, modification de l'acidité des pluies, augmentation de la pression anthropique associée à une forte croissance démographique, etc. Ce constat a conduit à la mise en place de l'Observatoire de l'Érosion aux Antilles (ObsErA) soutenu par l'Institut de Physique du Globe de Paris, l'Observatoire Volcanologique et Sismologique de Guadeloupe, l'Universités Antilles-Guyane, l'Institut Universitaire Européen de la Mer et l'Université Lyon I (<http://www.ipgp.fr/obs-era>).

L'objectif d'ObsErA, labellisé Service d'Observation de L'INSU depuis janvier 2011, est de permettre la constitution d'une base de données des flux d'eau (précipitations et débit des rivières), des flux de sédiments et de matière organique (en particulier de carbone) dans les rivières et sur les versants ainsi que de la composition chimique des rivières et des sols dans le contexte particulier de l'île de Basse-Terre, marquée par un climat tropical et un volcanisme actif. Cette base de données permettra à la communauté scientifique d'étudier et de quantifier les modes de dénudation chimique et physique, leurs couplages et leur impact sur l'environnement (composition des sols, chimie des rivières, flux de carbones, etc.). ObsErA se fixe en outre pour vocation la mise au point de nouvelles techniques de mesure du transport fluvial et de la dynamique des versants ainsi que de nouvelles méthodes de traçage (isotopique notamment) adaptées à la caractérisation de la dynamique des écosystèmes. Ce réseau est financé par les projets « érosion » de l'IPGP (PPF, INSU) et de la Région Guadeloupe.

Une partie de ce réseau a également pour but de caractériser l'impact de l'activité hydrothermale de la Soufrière sur la qualité des eaux de rivière captées pour la consommation en Guadeloupe afin d'identifier et d'évaluer le « risque chimique volcanique ».

Transport chimique et solide des rivières

Sites : 6 (CAP, RQ, PBD, BD, VH Savane, VH Crash Zone)

Sites instrumentés : 3 (CAP, RQ et BD)

Interventions : mensuel pour les sites instrumentés ; 2 personnes ; 2 jours/mois – 20 sorties en 2020 (10 pour CAP, 9 pour BD, RQ et PBD, 1 pour VH Savane et Crash Zone).

Le réseau de suivi de la géochimie des rivières comporte actuellement 3 sites instrumentés :

- un site installé sur la grande rivière de Capesterre (CAP)
- un site installé sur la rivière de Bras-David (BD)
- et un site installé dans une ravine (ravine Quiock, RQ).

Un autre site (rivière de Vieux-Habitants, VH) est suivi ponctuellement. Un à 2 échantillonnages de la rivière et survol de celle-ci à l'aide d'un drone sont effectués tous les ans.

La rivière de Petit-Bras-David (PBD) est également prélevée une fois par mois (sortie conjointe avec BD et RQ).

1 – Site de Capesterre

Instrumentation

En juin 2008, la station de Capesterre a été équipée d'un appareil (LISST) permettant de mesurer en continu la concentration et la granulométrie du matériel solide transporté. Les concentrations de particules en suspension de la Grande Rivière de Capesterre ainsi quantifiées sont comparées aux données acquises grâce au préleveur automatique ISCO. Ces mesures sont complétées par les mesures de débit de la DEAL et permettent d'apporter des contraintes aux questions suivantes : quelle est la durée efficace du transport des charges solides ; à quelle vitesse se produit l'érosion des berges ; quelle est la relation entre transport solide et dissous.

Un préleveur automatique d'eau (ISCO 6712) installé en août 2007 en collaboration avec la DEAL permet de prélever, sur déclenchement d'un seuil préfixé de hauteur d'eau, jusqu'à 24 échantillons. Début 2016, la sonde de pression, permettant de mesurer la hauteur d'eau et de faire déclencher le prélèvement, est tombée en panne. Une nouvelle sonde de pression a été installée en 2018, ce qui a permis de prélever 1 crue en 2018, 4 crues en 2019 et 2 crues en 2020.

Le site de Capesterre est équipé d'une centrale d'acquisition (CR800 de chez Campbell Scientific). Ce datalogger permet de collecter les données de différents capteurs installés dans la rivière (sonde de pression pour mesurer le niveau d'eau, sonde de turbidité et sonde de conductivité). La sonde de pression permet également de mesurer la température de l'eau. L'acquisition CR800 ainsi que les sondes de pression et de conductivité ont été remplacées par des neuves en 2020.

Une station météo est également installée sur ce site. Elle permet de recueillir des données sur la pluviométrie, l'humidité relative de l'air, la température de l'air, le degré d'ensoleillement, la pression de l'air, la vitesse et la direction du vent. Ces données sont enregistrées sur un datalogger de chez Campbell Scientific. Anciennement l'acquisition était une CR200 qui a été remplacée par une CR300 Courant 2019.

En 2017, une caméra visible a été installée sur le site par Emmanuel Augereau (UMR 6538 Domaines Océaniques, IUEM Plouzane). Elle permet d'acquérir des films d'une minute toutes les heures pendant le jour. Ces films servent à caractériser le transport solide et l'évolution du lit de la rivière. Ces acquisitions haute fréquence sont à coupler et comparer avec les données fournies par les survol de drone.

L'installation de cette caméra a nécessité de quadrupler l'énergie solaire présente sur le site. En 2020 et suite au différentes coupures observées durant la nuit pour l'ensemble du site, nous avons remplacé les quatre batteries et les quatre régulateurs par des neuves,



Figure 2.25 : Caméra visible – site de CAP (gauche) ; Coffret d'acquisition de la caméra (en haut à droite) ; Nappe de panneaux solaires (alimentation caméra, CR800, CR200 et préleveur) (en bas à droite) ;

L'ensemble des données (CR800, CR300 et caméra) est recueilli tous les mois et intégré à la base de données d'OBSERA.

Prélèvements et analyses

Tous les mois, des prélèvements manuels d'eau sont effectués sur ce site. Les analyses faites par la suite en laboratoire sont :

- la mesure de l'alcalinité par titration automatique (analyses réalisées à l'OVSG)
- le dosage des anions et des cations par chromatographie ionique (analyses réalisées à l'OVSG)
- la quantification de la teneur en silice (marqueur de l'altération) par spectrophotométrie visible (analyses réalisées à l'OVSG)
- le dosage des traces (analyses réalisées à l'IPGP)
- le dosage du carbone organique dissout (analyses réalisées à l'IPGP)

Un prélèvement d'eau est également effectué puis envoyé à Bill McDowell (collaboration, University of New Hampshire).

Les paramètres physicochimiques de la rivière sont mesurés à l'aide d'un pH-mètre / conductimètre de terrain. Sont ainsi relevés la température, le pH, la conductivité, l'oxygène dissous et le potentiel rédox de l'eau.

Drone

Depuis plusieurs années, le site de Capesterre fait l'objet de survol annuel à l'aide d'un drone (Philippe Grandjean, Laboratoire de Géologie de Lyon). Ces survols permettent de suivre le charriage des galets et la morphologie du lit de la rivière à l'échelle d'une année hydrologique.

Depuis 2017, un survol plus régulier de ces sites est effectué (Thierry KITOU et Vincent ROBERT, OVSG, OBSERA), avec l'idée de cartographier l'impact des événements météorologiques extrêmes sur le charriage des galets dans la rivière et sur la morphologie du lit.

Le traitement des images drone et des films enregistrés par la caméra sont effectués par Pascal ALLEMAND (Laboratoire de Géologie de Lyon).

2 – Site de Bras-David

Instrumentation

Une centrale d'acquisition CR800 de chez Campbell Scientific, autonome en énergie (solaire + batterie Plomb), permet d'enregistrer les données acquises en continu par différents capteurs installés dans la rivière. Sont enregistrés par une sonde de pression la hauteur d'eau et sa température, la turbidité de l'eau (grâce à un turbidimètre) et la conductivité de l'eau (grâce à un conductimètre).

Les données sont recueillies tous les mois et intégrées à la base de données d'OBSERA.

En 2017, la batterie a dû être changée.

Au cours de l'année 2019 nous avons rajouté au site la mesure de la pluviométrie et celle de la pression de l'air. En 2020 un capteur avec son abri de ventilation pour la mesure de la température de l'air a été rajouté,

Suite à de nombreuses pannes sur la qualité des données de la mesure de la hauteur d'eau, nous avons installé fin 2020 un nouveau capteur avec les mêmes caractéristiques techniques que l'ancienne,

Prélèvements et analyses

Tous les mois, des prélèvements manuels d'eau sont effectués sur ce site. Les analyses faites par la suite en laboratoire sont les mêmes que pour le site de Capesterre.

Un prélèvement d'eau est également effectué puis envoyé à Bill McDowell (collaboration, University of New Hampshire).

Les paramètres physicochimiques de la rivière sont mesurés à l'aide d'un pH-mètre / conductimètre de terrain. Sont ainsi relevés la température, le pH, la conductivité, l'oxygène dissous et le potentiel rédox de l'eau.

3 – Site de Ravine Quiock

Instrumentation

Le sites est équipé d'une acquisition CR800 de chez Campbell Scientific pour la mesure du Débit, de la conductivité et de la température dans la ravine Quiock. Elle permet aussi la mesure de la hauteur dans 8 trous creusés à des profondeurs différentes. 7 points de mesure, numérotés de 1 à 7, créent ainsi un profil qui part perpendiculairement du lit de la ravine.

Le point de mesure numéro 2, a deux autres points, à sa gauche « upstream » et à sa droite « downstream » installés durant l'année 2017.

Depuis 2017, l'acquisition mesure pour les points 1 à 7 la conductivité de l'eau contenue dans les trous. Courant 2019, l'ensemble des capteurs de conductivité des piézomètres a été enlevé, à l'exception de celui présent dans la ravine Quiock.

Un pluviomètre présent sur le site permet de quantifier la quantité d'eau tombée sous le couvert Végétal.

Le passage du cyclone Maria en 2017 a fait des dégâts dans le lit de la ravine. Les arbres de la forêt de Quiock ont souffert eux aussi. Certains d'entre eux sont tombés pas loin de nos acquisitions.

Courant 2019, nous avons optimisé l'emplacement de la nappe panneaux solaire et augmenté la capacité énergétique de cette station.

Remplacement du régulateur solaire de la station par un neuf courant 2020,

Prélèvements et analyses

Tous les mois, des prélèvements manuels d'eau sont effectués sur ce site. Les analyses faites par la suite en laboratoire sont les mêmes que pour le site de Capesterre.

Un prélèvement d'eau est également effectué puis envoyé à Bill McDowell (collaboration, University of New Hampshire).

Les paramètres physicochimiques de la ravine sont mesurés à l'aide d'un Ph-mètre / conductimètre de terrain. Sont ainsi relevés la température, le pH, la conductivité, l'oxygène dissous et le potentiel rédox de l'eau.

4 – Site de Petit-Bras-David

Prélèvements et analyses

Tous les mois, un prélèvement manuel de la rivière est effectué. Les analyses faites par la suite en laboratoire sont les mêmes que pour le site de Capesterre, à l'exception du carbone organique dissout, qui n'est pas suivi sur ce site.

Les paramètres physicochimiques de la rivière sont mesurés à l'aide d'un Ph-mètre / conductimètre de terrain. Sont ainsi relevés la température, le pH et la conductivité de l'eau. Depuis 2019 sont également relevées et enregistrées les teneurs en oxygène dissout et les valeurs du potentiel rédox.

5 et 6 – Sites de Vieux-Habitants Savane et Crash-Zone

Prélèvements et analyses

En 2020, 1 seul prélèvement d'eau a été effectué au niveau du site de VH Savane. Les analyses faites par la suite en laboratoire sont les mêmes que pour le site de Capesterre, à l'exception du carbone organique dissout, qui n'est pas suivi sur ce site.

Drone

Depuis plusieurs années, deux sites de la rivière de Vieux-Habitants font l'objet de survol annuel à l'aide d'un drone (Philippe Grandjean, Laboratoire de Géologie de Lyon). Ces survols permettent de suivre le charriage des galets et la morphologie du lit de la rivière à l'échelle d'une année hydrologique.

Depuis 2017, un survol plus régulier de ces sites est effectué (Thierry KITOU et Vincent ROBERT, OVSG, OBSERA), avec l'idée de cartographier l'impact des événements météorologiques extrêmes sur le charriage des galets dans la rivière et sur la morphologie du lit.

Le traitement des images drone et des films enregistrés par la caméra sont effectués par Pascal ALLEMAND (Laboratoire de Géologie de Lyon).

En 2017, les cyclones IRMA et MARIA ont affecté l'archipel de la Guadeloupe. Un survol a été effectué avant et après ces épisodes météorologiques. Le traitement de ces images a permis la construction de 2 orthoimages. Seules ici sont présentées les orthoimages du site appelé Crash Zone.

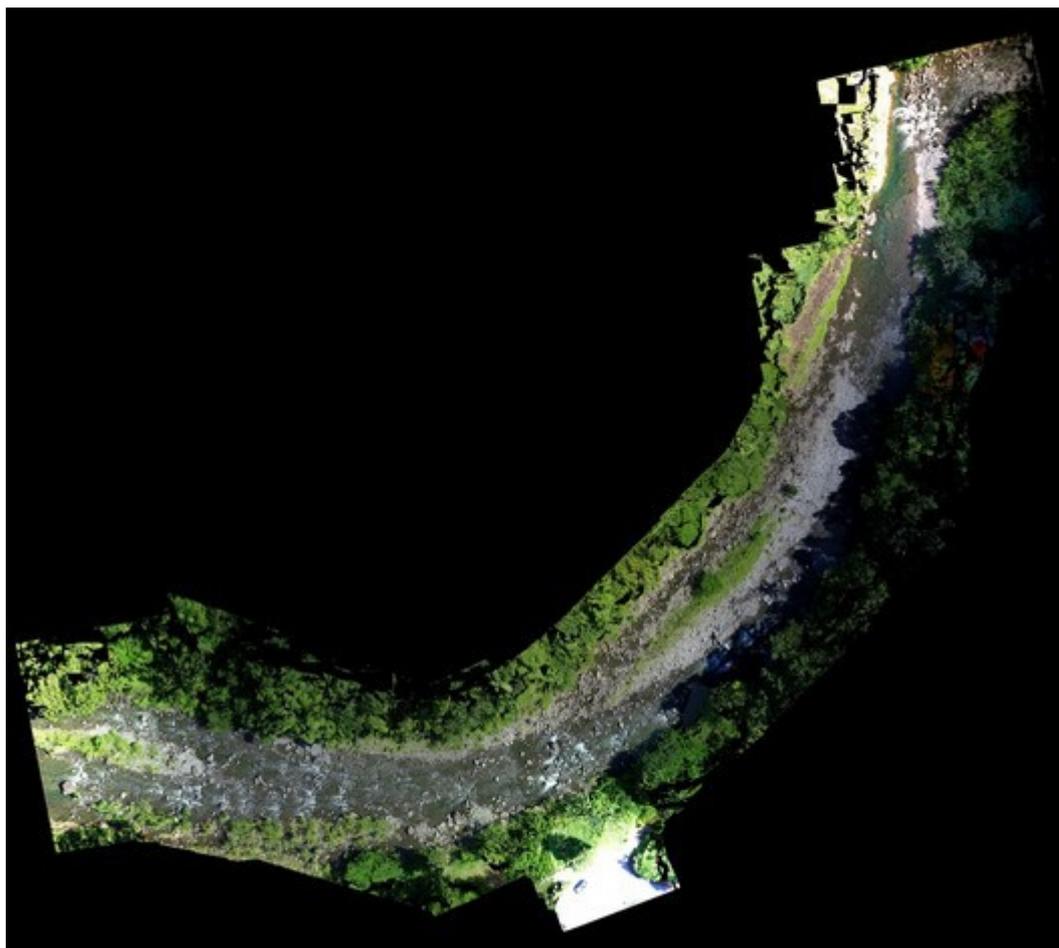


Figure 2.26 Orthoimage du site de Vieux-Habitants Crash-Zone – le 03/09/2017 avant IRMA et MARIA

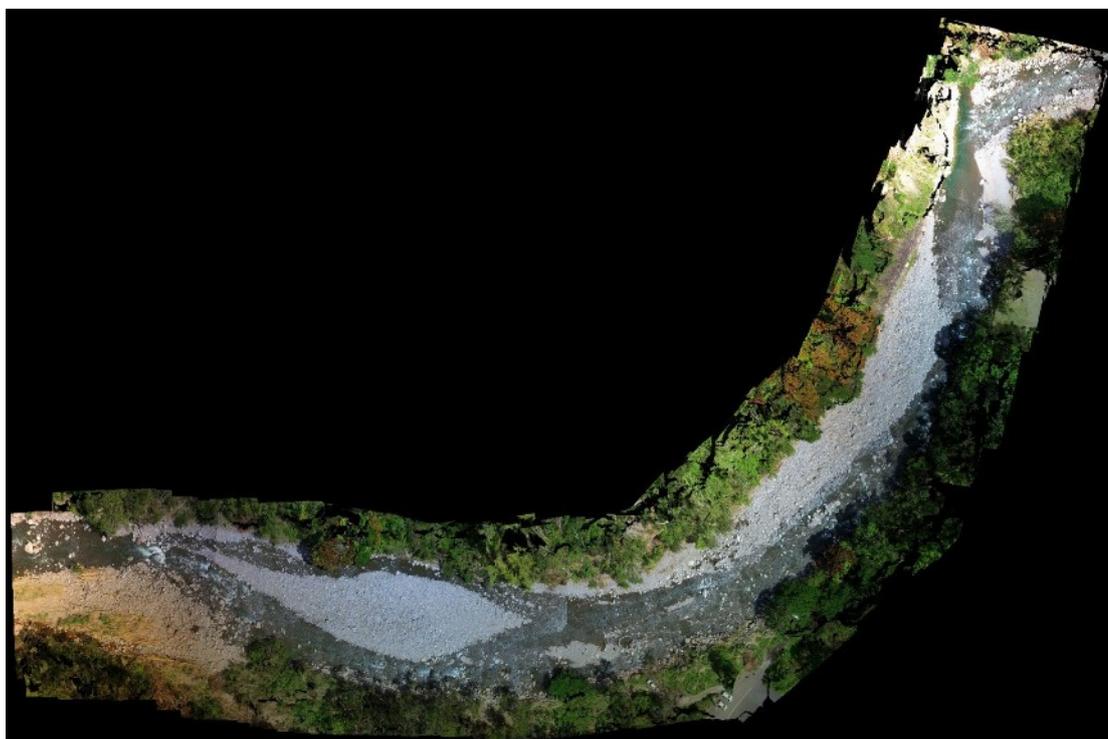


Figure 2.27 Orthoimage du site de Vieux-Habitants Crash-Zone – le 03/10/2017 après IRMA et MARIA

Transfert de l'eau dans les sols

Sites : 1 ; Echantillonnage : ponctuel ; 2 personnes ; 2 prélèvements en 2020 couplés aux sorties à RQ

L'étude des solutions de sol à différentes profondeurs est primordiale dans la compréhension des processus d'altération (échanges eau/minéraux/végétation). Le réseau d'étude de la dynamique de transfert dans les sols a été installé en juillet 2007 et il concerne 2 sites de référence (Rivière de Bras David et Gde Rivière Capesterre). Actuellement, un seul site reste opérationnel. Nous avons installé au total 16 lysimètres (profondeur de 15 à 1250 cm) et 11 tensiomètres (profondeur de 15 à 152 cm). Ce projet fait l'objet d'une collaboration scientifique avec l'USGS (U.S. Geological Survey) dans le cadre d'une étude comparative de l'érosion en Guadeloupe et à Puerto Rico. Un lysimètre est un système simple de prélèvement des solutions du sol par succion à travers une céramique poreuse placée à l'extrémité d'un canne creuse en PVC enfoncée à différentes profondeurs. Parallèlement, les tensiomètres sont utilisés pour mesurer le potentiel hydrique des sols (humidité).

2.5 Réseaux thermiques

- 1 personnel permanent ; interventions ponctuels d'autres personnels OVSG et collaboration avec D. Gibert (U. Lyon).
- Collaborateurs externes : P. Allemand (U. Lyon)
- 14 interventions en 2020

Résumé

La température et le flux de chaleur sont des observables primordiaux pour un volcan. Ceci est encore plus le cas lorsqu'il y a un système hydrothermal puisque la remontée et la condensation d'eau transportent de grandes quantités de chaleur jusqu'à la surface où se produisent les anomalies thermiques, les fumerolles et les sources chaudes. Effectivement, le bilan thermique est le plus grand composant sur le bilan énergétique d'un tel volcan. Donc un bilan thermique et son évolution temporelle étaient fortement voulus par l'OVSG depuis de nombreuses années.

Afin de combler cette lacune, un réseau de surveillance thermique est en cours d'installation depuis fin 2017. Ce réseau combine des mesures en continues à haute fréquence dans les fumerolles ainsi que des interventions ponctuelles avec une caméra thermique et d'autres instruments afin de mesurer l'étendue spatiale des anomalies thermiques, le flux de chaleur sortant du sol et de quantifier le débit des fumerolles. Un premier bilan complet a été calculé en 2020, et validé par plusieurs méthodes. Cette méthodologie permettra de calculer des futurs bilans afin de révéler des variations temporelles.

Mesures en continu de la température des fumerolles (D. Gibert, A. Bosson, X. Beguin)

- 5 sites (CSC, CSN, CSS, NAPN, NPEx)
- 7 interventions en 2020

La température des fumerolles à Cratère Sud (CS) est mesurée de manière continue depuis mi-Avril 2018. Des sondes de température, insérées au fond des événements, sont liées à un numériseur (Gantner eReader) et puis transmises par WiFi jusqu'à l'observatoire. Ces données, acquises à une fréquence de 1 Hz, dont un exemple est donné ci-dessus, démontrent une richesse de comportements complexes dans les variations de température et couplages entre les différentes sorties fumerolliennes. Une série de sondes mesure aussi les variations de température dans le sol entre les sites de CSC et CSS. Ces températures sont très fortement corrélées avec celles des fumerolles et pourrait indiquer le mouvement de fluides entre les deux sites. Les données acquises à CS sont disponibles sur WebObs.

Deux sites supplémentaires (NAPN, NPEx) ont été aussi équipés de sondes liées à un numériseur de type QStation (Gantner). Ces sites acquièrent des mesures depuis début 2019 mais dû aux formats incompatibles entre ces deux modèles de numériseurs, la mise à disposition des données sur WebObs n'a pas encore abouti. L'équipement électronique à Cratère Sud avait commencé à fortement vieillir et a causé plusieurs pannes au cours de cette dernière année. Cette équipement a donc été complètement renouvelé par du matériel acheté dans le cadre de l'ANR MEGaMu (S. Bouteille), action qui a homogénéisé les modules d'acquisition pour la température et rendra la mise à disposition et traitement des données plus simple.

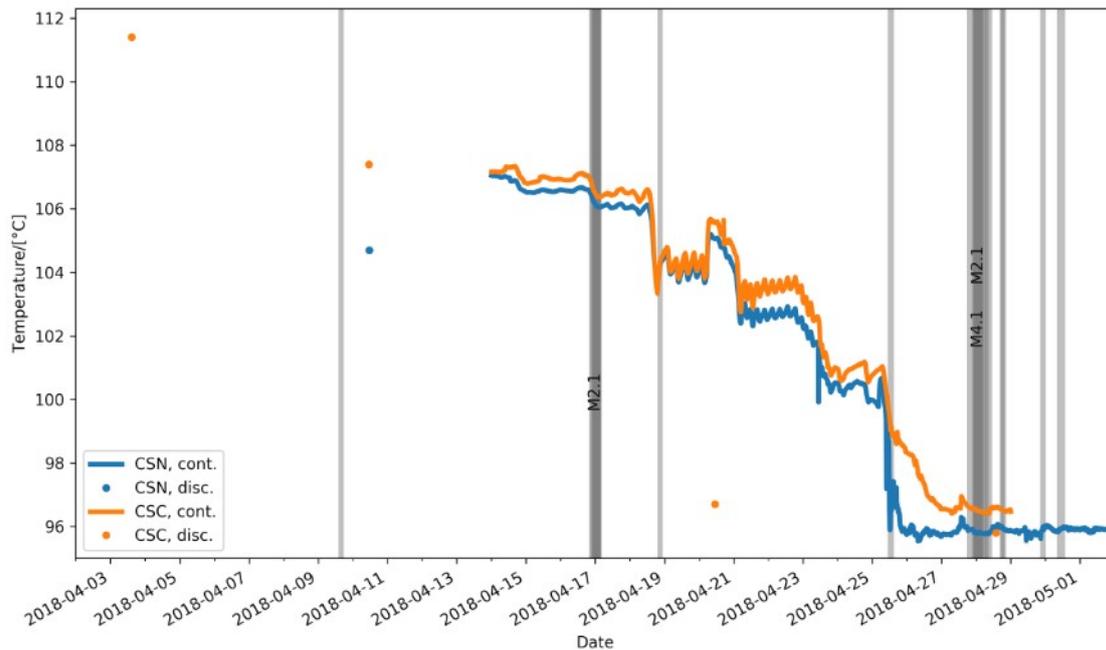


Figure 2.28 L'évolution de température au cours de temps de Avril à Juin 2018, mesures en continu et ponctuelles. Les barres en gris représentent les séismes volcaniques, dont la largeur indique leur magnitude. Adapté de Moretti et al. (2020)

Mesures ponctuelles

Vitesse et flux de fumerolles par "tube de Pitot" (D. Gibert, T. Kitou, T. Didier, X. Beguin)

- 4 sites (CSC, CSN, CSS et NAPN)
- 5 sorties en 2020

Avec un "tube de Pitot", dispositif qui mesure la chute de pression due au mouvement d'un fluide, la vitesse de certains fumerolles est mesurée à partir de l'équation de Bernoulli. Ces mesures sont bien sûr limitées aux sites où l'accès est possible sans mettre en danger l'opérateur tels que NAPN, CSC et CSN. D'autres sites comme CSS ont été mesurés moins fréquemment et les mesures sont effectuées avec l'aide des Sapeurs Pompiers spécialisés en accès cordé. Ces données de vitesse sont par la suite transformées via des relations thermodynamiques en débit de masse, et débit d'énergie thermique. Comme l'on voit dans la figure ci-dessous, depuis le début de ces mesures en fin 2017, nous voyons une tendance de croissance lente pour le débit de masse sur les sites CSC et CSN bien que à CSS le débit a décru fortement depuis mi-2018, puis a atteint le niveau le plus haut depuis le début de mesures en Juillet 2020. Le débit à NAPN reste faible et relativement constant sur cette période. L'instrument le projet de développement d'un nouveau modèle plus robuste est en cours de développement avec une mise en service prévu prochainement, malgré de gros retards dû à la situation sanitaire. Une mise à disposition des données sur WebObs est en cours.

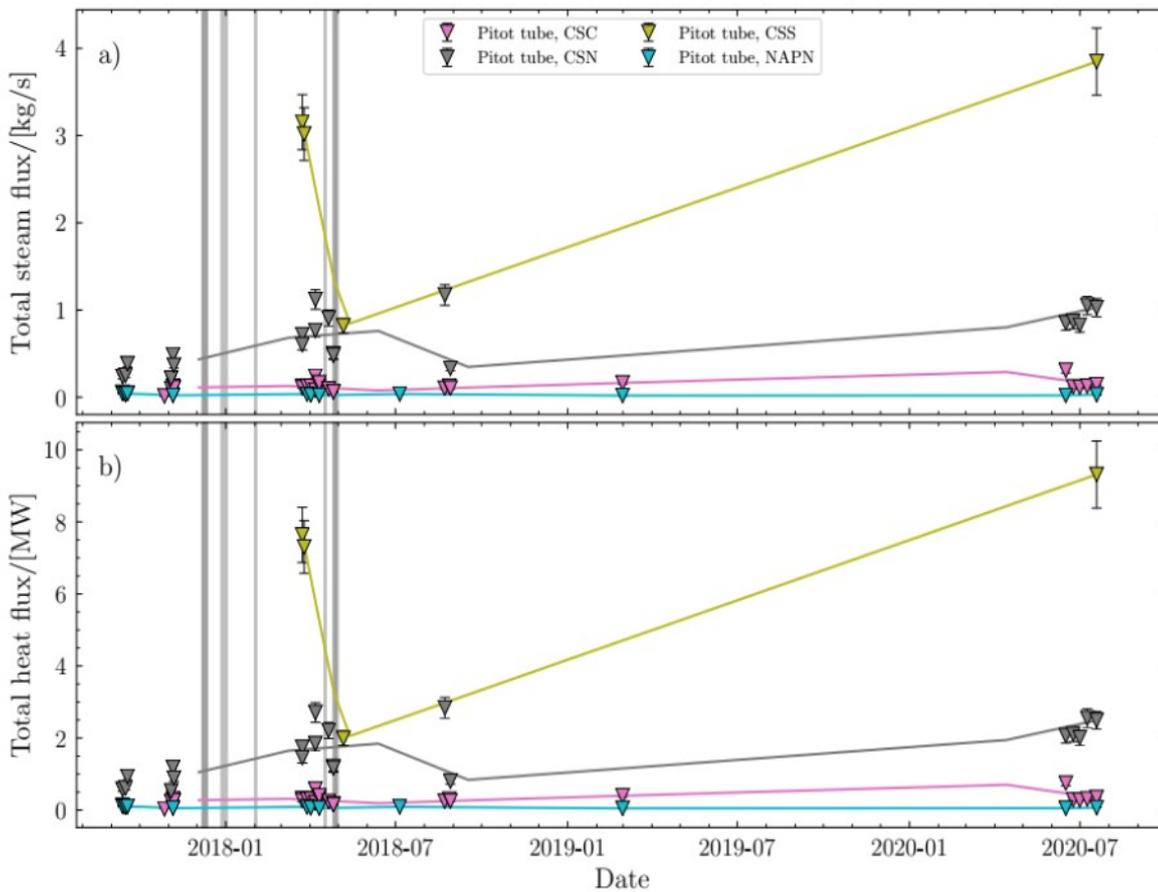


Figure 2.29 Débit de masse et flux de chaleur émises depuis des fumarolles principaux depuis fin 2017, mesures du tube de pitot. Les barres en gris représentent les séismes volcaniques, dont la largeur indique leur magnitude. Modifiée de Jessop et al. (2021).

Caméra thermique

Cet instrument, acheté dans le cadre du projet MOM (C. Dessert) en 2015, enregistre le rayonnement infrarouge d'un objet. Il est d'une part utilisée afin de mesurer les anomalies de températures au sol sur le sommet et flancs du volcan et, d'autre part, afin d'enregistrer les flux de fumarolles via l'analyse des image thermiques.

Anomalies thermiques

- 6 sites (FTY, Matylis, RC, BLK, NAP, ZFNN)
- 4 sorties en 2020

Des images thermiques et les points d'appuis, dit « ground control points », sont acquis aux sites montrant des anomalies thermiques. A partir de telles images, une orthophotomosaique (Oim) géoréférencée est produite par le logiciel Micmac (IGN-IPGP) par la méthode de « Structure from Motion » (SfM), le but étant de poursuivre pour chaque site les variations temporelles et spatiales de température aussi que le flux de chaleur.

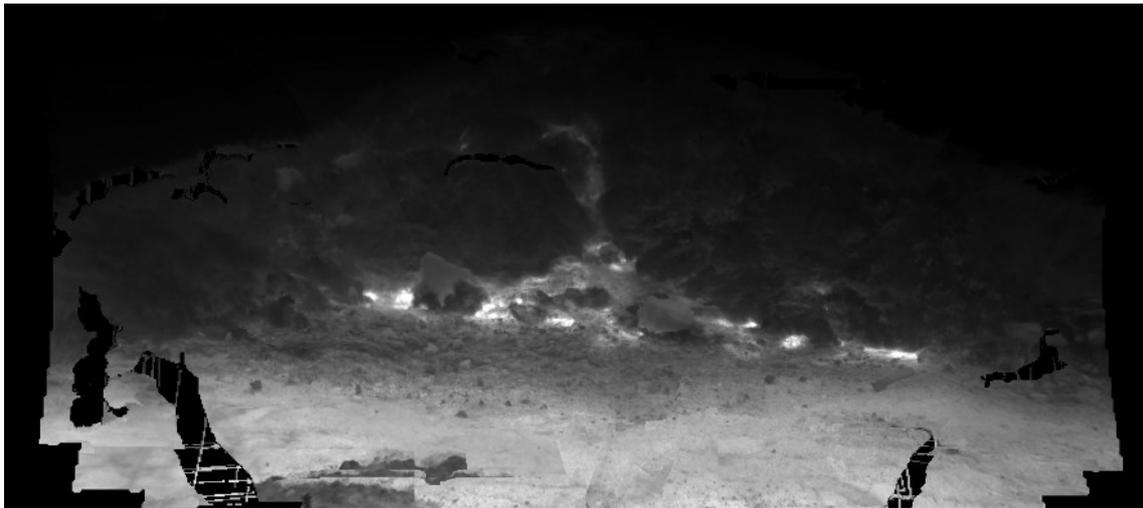


Figure 2.30 Image orthorectifiée du site dit « Faille de la Ty » (FTY), prise la 2020-01-30. Cette image est composée d'une trentaine d'images individuelles avec une résolution spatiale inférieure à 2 cm/pixel.

Les images thermiques aériennes prises en Novembre 2019 avec l'aide de l'hélicoptère du SIDPC ont été traitées, validées et seront publiées dans le prochain volume du Bulletin of Volcanologie. Elles démontrent la forte activation dans la zone ZNFF, comme montré dans la figure ci-dessous, bien que les autres sites d'anomalie thermique sol n'ont pas changé d'activité depuis les mesures effectués en 2010 (Gaudin et al., 2016).

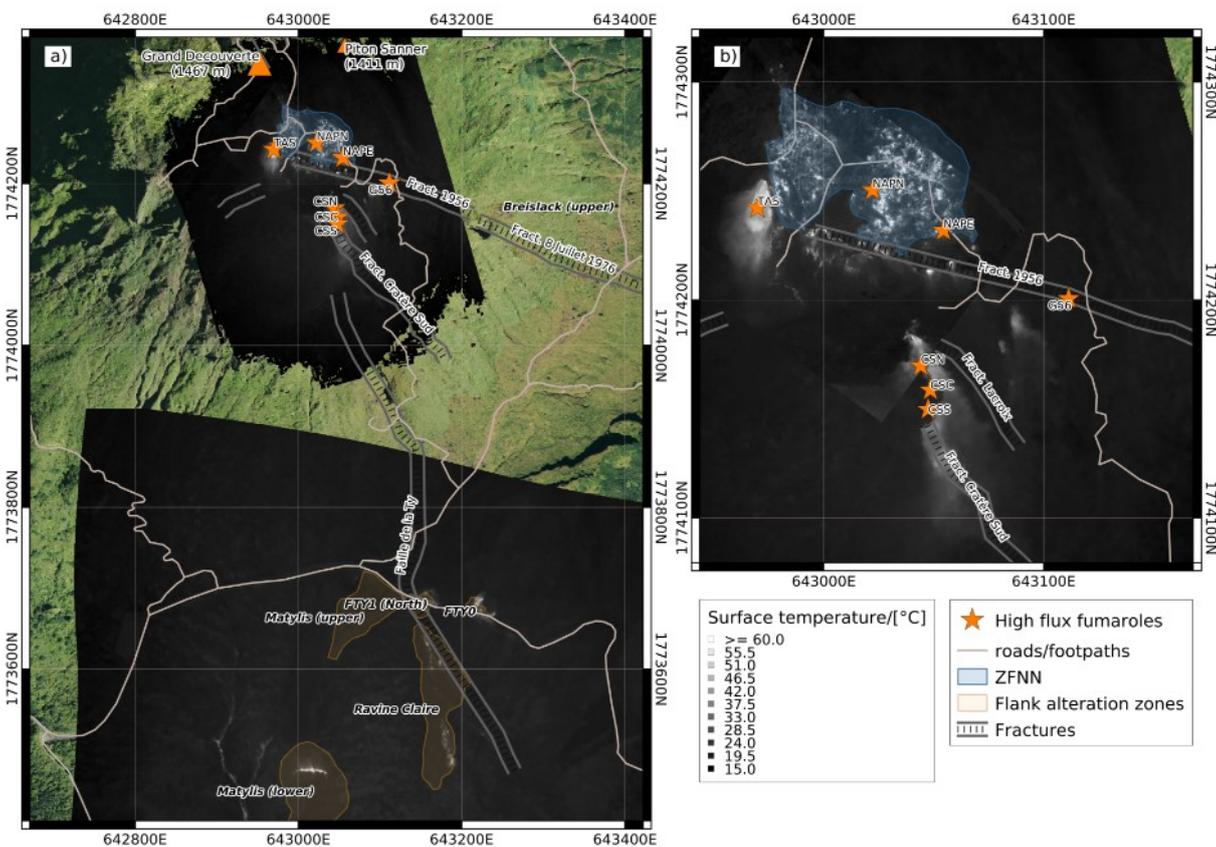


Figure 2.31 Images thermiques aériennes géoréférencées de la Soufrière et ses alentours à 1:4000 échelle (a) et à 1:2000 échelle (b). Les anomalies thermiques dans la zone somital "interdit" apparu depuis 2014, appelé ZFNN, sont clairement visibles. Figure prise de Jessop et al. (2021).

Flux de fumerolles :

- 7 sites (CSC, CSN, CSS, NAPN, NAPE, TAS, G56)
- 8 sorties en 2020

L'autre utilisation des images thermiques est de contraindre les flux de fumerolles. Ceci nécessite qu'un grand nombre d'images soient prises à chaque site et ensuite analysées afin de déterminer le mouvement moyen (trajectoire, largeur, température) de ces objets turbulents. Ensuite les conditions sources d'un modèle de panache sont ajustées pour que le modèle correspond aux mieux avec le mouvement du panache naturel. Car l'opérateur peut se mettre à distance de la fumerolle et ces émissions dangereuses, cette technique permette d'obtenir le flux a un plus grand nombre de sites que celle du tube de pitot. Elle est en cours de développement ayant fait sujet d'un stage de Mars à Mai 2019 d'une étudiante en M1 à l'IPGP/STEP. Dès que la méthode est validé, ces données seront mis à disposition sur WebObs.

Projets en cours

Gradient de température sol (OVSG + OPGC/SNOV)

Le climat et les conditions corrosives de la Soufrière ne permettent pas des sorties avec la caméra thermique à très haute fréquence. Or ce flux peut être également obtenu en connaissant le gradient de température dans le sol proche de la surface. Ceci nécessite l'installation de sondes de température dans le sol à différentes profondeurs, dont leurs valeurs sont numérisées et soit stockées localement, soit télémètres à un serveur à distance. Bien qu'un tel instrument ne fournit que des informations sur le flux sur un seul point spatial, ses mesures sont répétées à très haute résolution temporelle. Un prototype à été conçu et installé à ZFNN de Juillet 2018 à Octobre 2019, et un projet pour la construction des instruments plus robustes à été financé par l'OPGC-UCA (crédits SNOV) en 2018 avec le but de les installer en Mars 2021.

Imagerie thermique et visible aéroportée (D. Jessop & T. Kitou) :



Figure 2.32 Oim géoréférenciée du Matylis Supérieur, en bordure de la Faille de la Ty et de la Ravine Claire.

Grâce au financement obtenu par l'AO-IPGP 2019 « Pôle Drone », d'un drone DJI Matrice 210RTK, équipé d'une caméra thermique ainsi qu'une caméra visible a été acheté et sera bientôt disponible

pour les OVS Antilles, basé principalement à l'OVSG. Ce drone est conçu pour supporter les conditions de vol difficiles telles que celles souvent rencontrées sur la Soufrière. Deux membres de l'OVSG (David Jessop et Thierry Kitou) ont obtenu des brevets de télépilote professionnel drone (DGAC/FPDC) en Janvier 2021 et seront chargés de l'organisation et réalisation des survols.

L'imagerie ainsi acquise sera transformé en Oim thermiques (comme l'exemple ci-dessus) et visibles, dont un exemple est donné ci-dessous. Les Oim seront utilisées afin de poursuivre l'étendu des anomalies thermiques et de l'altération des sites tels que au sommet (ZFNN), dans la ravine Matylis, autour de la faille de Breislack, à la ravine Claire et, potentiellement, les nombreux sites de glissement de terrain.

Organisation prévue pour le départ de D. Jessop

David Jessop effectuera une remutation vers l'OPGC-LMV en Septembre 2021 et ne seront donc plus present en permanence à l'OVSG. Cependant, il continuera ses tâches d'observation basé sur l'activité thermique de la Soufrière. Les réseaux thermiques continueront de fonctionner grâce aux installations permanents (température de fumerolles, température et gradient de température du sol). D'autres membres de l'OVSG pourront mesurer les flux de fumerolles avec les instruments Pitot et les flux de chaleur seront calculés de manière automatique par le biais d'un PROC WebObs prévu pour ceci.

2.6 Réseaux météorologiques

Les conditions atmosphériques jouent un rôle sur l'activité volcanique superficielle. En particulier l'apport en eaux météoriques sur le massif est l'une des composantes importantes pour l'étude du système hydrothermal et doit être mesuré afin de mieux comprendre les perturbations du massif par corrélation avec les autres mesures. Les réseaux de surveillance météorologique sont pour cela axés essentiellement sur la pluviométrie, en collaboration avec *Météo France*. Les autres paramètres météorologiques tels que la pression, la température, l'humidité et le vent, servent à calculer par exemple, les délais de propagation des ondes dans l'atmosphère pour effectuer des corrections (GPS) ou plus simplement à optimiser les missions de terrain.

Météorologie complète

Stations : 2

Interventions : 3

Ce réseau permet de mesurer en temps-réel les caractéristiques atmosphériques sur le massif de la Soufrière, notamment pour corriger certaines mesures géodésiques des effets météorologiques. La station du sommet (la seule station météorologique automatique télémétrée en site montagneux dans la Caraïbe), enregistre en continu plusieurs paramètres (température, pression, hygrométrie, ensoleillement, vitesse et direction du vent, pluviométrie) qui peuvent être pris en compte dans le traitement et l'interprétation des données géophysiques, géochimiques, et phénoménologiques du réseau de surveillance. Les données de cette station sont mises à la disposition de *Météo France* Guadeloupe et du Laboratoire de Physique de l'Atmosphère Tropicale de l'Université Antilles-Guyane, par l'intermédiaire d'un site Web en accès restreint.

Le système d'alerte automatique de fortes pluies, à partir des données de cette station, est opérationnel : lorsque qu'un seuil de 50 mm de pluie en 24 heures est détecté au sommet de la Soufrière, une période de 3 jours est définie pendant lesquels certains sols sont supposés saturés en eau, et donc susceptibles d'engendrer des éboulements. Cette alerte est visible sur les graphes temps-réels de la station. Ce système est utilisé notamment pour tenter de réduire la prise de risque lorsque des travaux sont nécessaires sur le dôme de la Soufrière et sur la route de Tarade.

Depuis Mars 2016 la station météo dispose de matériels d'acquisition et de mesure tout neufs. Nous avons aussi modifié le mode de transmission radio par du wifi et améliorer nos outils pour le

traitement des données à l'obs en implémentant le format standard d'échange de données « Miniseed ».

Pluviométrie Soufrière : OBSERA, OVSG

Stations : 1 ;

Interventions : 1

En début d'année 2020 OBSERA a fait l'acquisition pour les études du bilan hydrique et une meilleure compréhension de l'alimentation en eaux météoriques du système hydrothermale du volcan de la Soufrière, d'un pluviomètre qui a été installé sur le site de la Savane à Mulet à côté de la station Forage Savane à Mulet.

La station dispose d'une acquisition CR300 de chez Campbell Scientific et fait l'acquisition cumulée au pas de un point tout les dix minutes de la pluie mesurée.

La transmission se fait par le biais de la transmission WIFI de la station forage de l'OVSG.

Pluviométrie Météo-France

Stations : 7 ;

Interventions : 0

Ce réseau permet de contrôler la pluviométrie sur le massif de la Soufrière au sens large, et sur deux sites proches de stations magnétiques régionales. Les instruments font partie du réseau guadeloupéen de *Météo France*, installés et maintenus en collaboration avec l'OVSG pour certaines stations : l'OVSG a été responsable du relevé hebdomadaire des données de Saint-Claude (PARNASSE) jusqu'en 1993, du relevé hebdomadaire en alternance avec *Météo France* pour les données de la Citerne (CITERNE), du sommet de la Soufrière à Dent de l'Est (SOUFRIERE) jusqu'en 2000.

Durant l'année nous avons arrêté avec le concours de météo France les relevés hebdomadaire des données de Goubeyre (HOUELMONT). Ceux-ci ont été remplacés par une acquisition automatique de la mesure de la pluviométrie. Les données acquises sont stockées sur les serveurs de l'observatoire et transmis à Météo France par voie électronique.

Ces données sont intégrées dans les routines graphiques automatiques de l'observatoire, et permettent d'avoir une vue d'ensemble des apports en eaux météoriques sur le massif.

2.7 Acquisition, traitements et archivages des données sismologiques

Nous disposons depuis 2013 d'une chaîne de traitement sismologique entièrement basée sur des flux de données au standard international SEED (Standard for the Exchange of Earthquake Data (SEED) Version 2.4

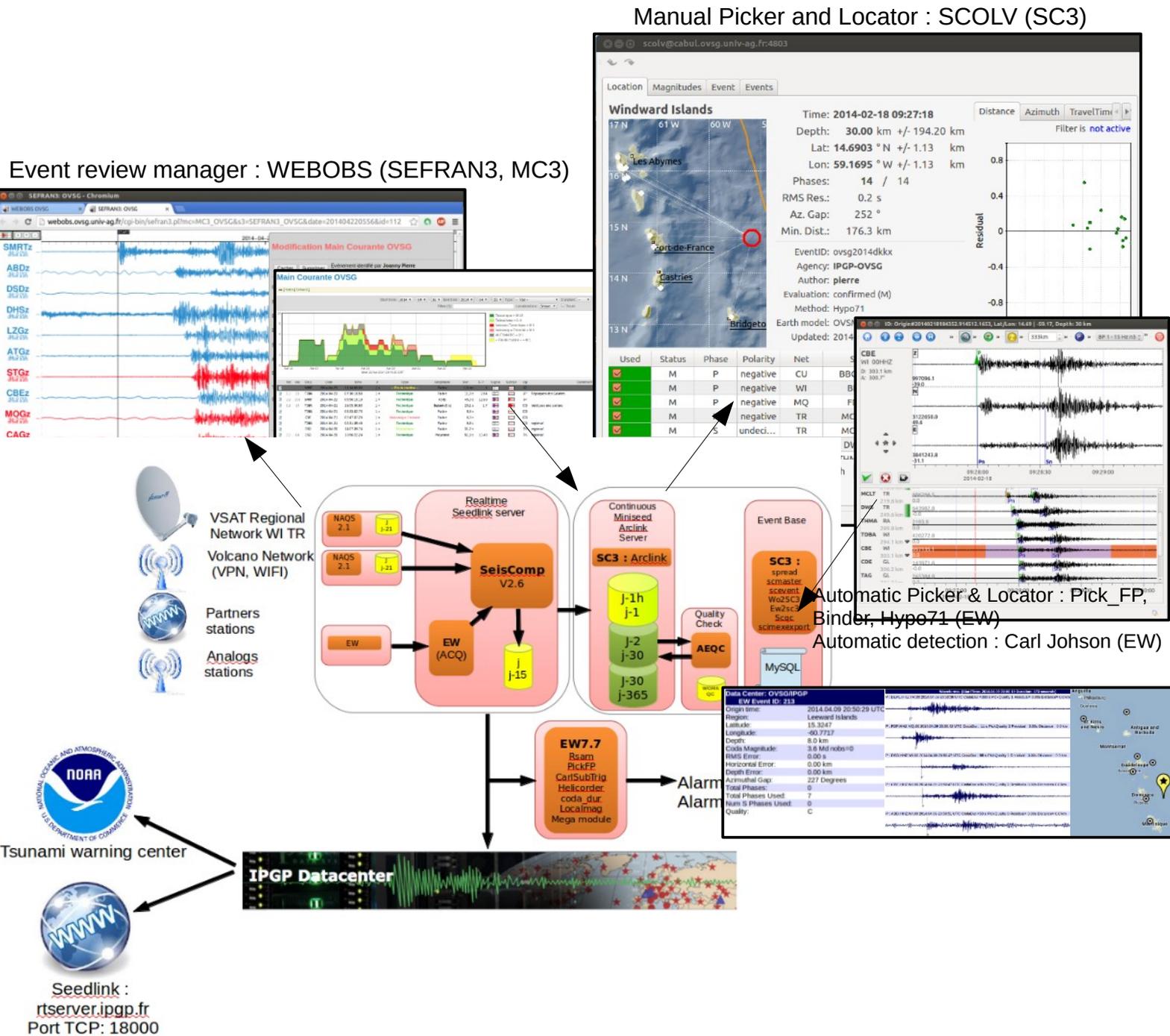


Figure 2.33 Conception et flowchart de la chaîne de traitement de données sismologiques

Acquisitions :

- **Acquisitions réseau sismologique analogique**

Les données des 9 stations courtes-périodes à transmission radio-analogique sont numérisées par deux Centaurs de chez Nametrics,

La transmission des données se fait directement au format Minissed et alimente directement le serveur de données temps réel : SeisComp

- **Acquisitions réseau sismologique Numérique Large bande**

Les données des 11 stations numériques Large Bande à transmission radio WIFI sont acquises à l'aide de système type Taurus ou Centaur de chez Nametrics,

La transmission des données se fait directement au format Minissed et alimente directement le serveur de données temps réel : SeisComp

- **Acquisition numérique (*Nanometrics*)**

Ce système est un logiciel d'acquisition liée aux numériseurs de l'industriel canadien Nanometrics que nous utilisons dans nos stations régionales et sur le volcan. Cette chaîne d'acquisition logicielle permet de mettre à disposition en temps réel les données des stations vers notre serveur de données temps réel SeisComp. Elle permet également de gérer automatiquement les procédures de re-transmission permettant de redemander à une station un paquet de données perdu lors de la transmission, pour obtenir l'archive la plus complète possible indépendamment des aléas de transmission.

Cette chaîne logicielle s'appuie sur des logiciels Nanometrics NAQS, très robustes, développés depuis des années pour les besoins du CTBTO (Organisation du Traité d'Interdiction Complète des Essais Nucléaires).

Cette acquisition reçoit les données du réseau régional par satellite (VSAT), les stations numériques du réseau de surveillance de la Soufrière et des 3 stations RAP continues.

- **Acquisition réseau accélérométrique**

À l'exception de Sept stations (voir « acquisition numérique Nanometrics »), les données accélérométriques du RAP sont rapatriées par téléphone. Les « déclenchements » correspondants aux séismes du catalogue de l'OVSG, mis à jour lors du pointé d'un séisme par un opérateur ou par le système automatique, sont rapatriés tous les jours à 00h TU. Les « déclenchements » sont ensuite triés visuellement.

Ces données sont régulièrement transférées vers le gestionnaire du réseau RAP : l'université de Grenoble

Traitements :

- **Serveur de données temps réel :**

C'est la première partie de la chaîne de traitement : ce serveur permet la collecte des données sismiques provenant des différents réseaux, de différentes technologies, de différents formats, afin de créer un flux homogène rassemblant toutes les stations disponibles en temps réel à l'observatoire.

Ce flux est ensuite dirigé vers 3 clients :

Le centre de données IPGP à Paris : qui a pour rôle la redistribution toujours en temps réel de ce flux vers nos partenaires (Centres d'alerte tsunami, Centre de surveillance sismique mondiaux, réseaux partenaire,...) Ce flux est également archivé temporairement par sécurité.

Le serveur de données continu

(voir ci-dessous)

Le serveur de détection automatique.

(voir ci-dessous)

- **Le serveur de données continu**

Ce serveur a pour fonction d'archiver les données sismologiques sur le long terme. Les données y sont organisées dans une archive au format SDS (norme SEED V2.4).

Le Logiciel AEQC (mis au point à l'IPGP) a pour fonction l'amélioration de l'archive SDS. Il analyse une période de 30 jours pour laquelle il va essayer de compléter l'archive en recherchant via les réseaux instrumentaux et les réseaux partenaires les pièces manquantes.

La fonction ARCLINK permet de fournir les formes d'ondes aux logiciels permettant de localiser les séismes (si l'âge des données est supérieur à 1 heure).

Ce serveur contient également une base MySQL fournissant le catalogue, à jour, de tous les séismes localisés.

- **Le serveur de détection automatique.**

Le serveur EWTRAIT s'appuie sur une suite de logiciels libres américains EarthWorm bien connus dans le monde de la sismologie.

Plusieurs modules reçoivent et s'échangent les données sismiques temps réel. Un étage étudie les signaux à travers différents filtres pour détecter une possible onde sismique, puis un corrélateur associe ces temps d'arrivée pour définir la probabilité d'une origine commune, ensuite un algorithme de localisation cherche à trouver l'origine du séisme en minimisant les erreurs sur ces temps d'arrivée.

Lors de la détection d'un séisme ce serveur lance une alerte SMS et email. Il remplit également notre catalogue de séismes avec une mention automatique, afin qu'un utilisateur vérifie cette origine à posteriori.

Ce serveur produit également des "helicorders" : feuille de tambour numérique représentant l'activité sismique journalière d'une station à la façon des anciens sismographes papier. Ces images sont utilisées pour vérifier le fonctionnement de chaque station.

2.8 Acquisition, traitement et alerte GNSS (Global Navigation Satellite System)

Chaîne d'acquisition et de traitement GNSS

Un serveur informatique virtuel de l'observatoire est dédié à l'acquisition, l'archivage et le traitement des données GNSS. Les programmes informatiques qui y sont exécutés gèrent automatiquement le rapatriement des données journalières, traduisent les données en formats standards avant de calculer les positions et de les archiver.

Chaque jour les sessions de rapatriement et d'archivage parcourent les données acquises durant les 15 derniers jours et effectuent des tentatives de rapatriement des données si certains fichiers sont manquants ou incomplets. À la fin du processus, un e-mail est envoyé aux opérateurs afin de rendre compte de la complétude de l'archive.

Les données acquises sont archivées dans un premier temps à l'observatoire, puis elles sont synchronisées toutes les nuits avec les archives situées à l'IPGP. Les données archivées sont ensuite utilisées indépendamment à Paris et à l'OVSG pour traitement et affichage des résultats via notre interface WebObs.

À l'OVSG, le script de traitement parcourt les fichiers de notre archive pour les derniers jours et vérifie si un calcul a déjà été effectué à l'aide du logiciel GipsyX (édité par le JPL *Jet Propulsion Laboratory* de la NASA) avec l'orbite dite *définitive* (c'est à dire la plus exacte possible) des satellites GPS, fournie par le site web du JPL. Si ce n'est pas le cas, il lance un calcul avec l'orbite la plus précise disponible à ce moment-là sur le site web. Si un calcul de position a déjà été effectué avec une orbite non définitive, il relance le calcul avec une orbite plus précise, pour tester sa disponibilité. Le but est de fournir aussi vite que possible un premier calcul de position, qui sera affinée aux prochains lancements du script dès que les orbites plus précises seront disponibles.

Pour chaque station, un fichier de type « *sitelog* » (un fichier texte au format standardisé) conserve une description précise des sites de mesure, des caractéristiques du matériel de la station et de sa configuration et de leurs évolutions dans le temps. Ces fichiers sont distribués avec les données GNSS via le portail web VOLOBSIS et permettent à toute personne intéressée de recalculer de manière plus simple et plus fiable les positions quotidiennes de chaque site depuis la création de la station.

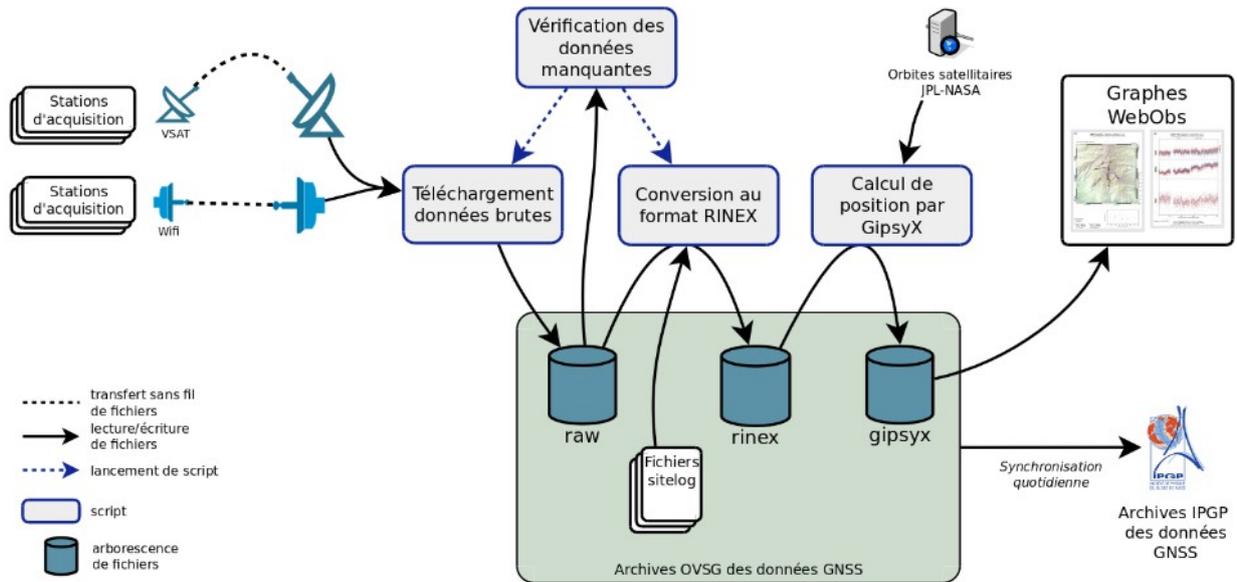


Figure 2.34 Fonctionnement de l'acquisition GNSS : Des scripts automatisés se chargent d'effectuer les tâches. Les téléchargements de données manquantes sont tentés à plusieurs reprises durant 15 jours. Les calculs sont effectués jusqu'à obtention des orbites précises (en général 21 jours). Des e-mail sont envoyés aux opérateurs afin de suivre le déroulement de chaque étape.

Alerte aux déformations par GNSS

Dans le contexte de réactivation de la soufrière et suite au séisme volcano-technonique du 28 avril 2018, l'OVSG a bénéficié d'un support exceptionnel de la part du Ministère de la Transition Écologique et Solidaire pour renforcer les moyens de surveillance du volcan. Parmi les actions engagées, il a été décidé de mettre en place un système d'alerte sms temps-réel basé sur les déformations du volcan mesurées par les réseau de GNSS permanents dédié à la surveillance de la Soufrière.

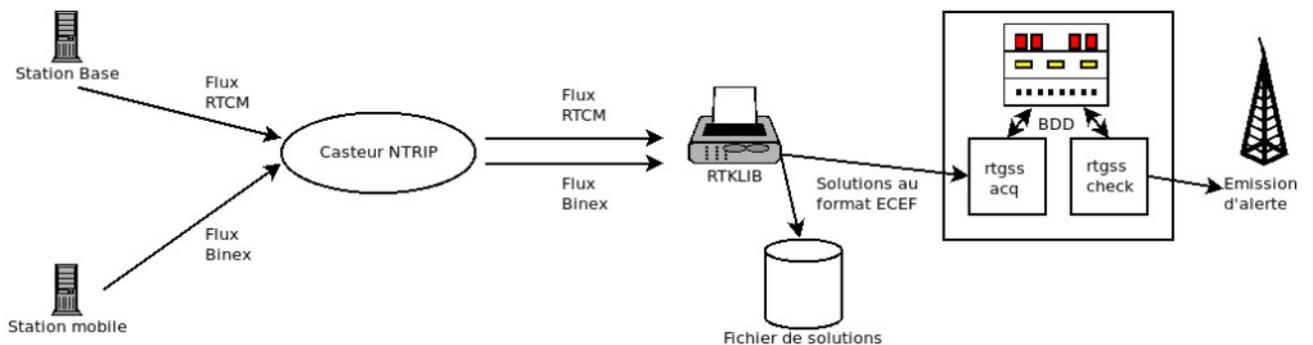


Figure 2.35 : Architecture de la solution choisie

Les récepteurs GNSS transmettent leurs observations via un casteur NTRIP. Le protocole utilisé est différent en fonction du type de station. Dans le cas des stations « mobiles » le protocole

utilisé est le Binex, un format binaire d'observations brutes. Dans le cas des stations « base » le protocole utilisé est RTCM, les données transmises ne sont pas brutes mais des corrections différentielles à appliquer aux mobiles. Le logiciel rtkrcv (fourni dans la solution RTKLIB) utilise ces flux pour calculer les coordonnées précises du mobile à intervalle régulier. Ces solutions sont archivées dans un fichier et transmises au script rtgss_acq.py via une socket réseau. Ce script insère les solutions reçues dans une base de données. Un second script rtgss_check.py contrôle les coordonnées en base au cours du temps et émet une alerte en cas de déplacement anormal.

Adaptation de cette solution au réseau GNSS de l'observatoire

Actuellement nous travaillons à adapter la solution décrite plus haut au réseau de surveillance GNSS de l'OVSG. Il s'agit

- D'effectuer des tests pour sélectionner les stations qui participeront effectivement à l'alerte.
- De déterminer les seuils d'alertes pertinents compte tenu du contexte géologique et des connaissances actuelles sur la dynamique des glissements de terrain et destabilisations de flanc

Développements envisagés

Les deux principaux points d'action actuels sont l'amélioration des tests des scripts python rtgss et le développement d'un système d'acquisition de données GipsyX pouvant se substituer au système d'acquisition actuel basé sur rtkrcv. L'objectif est de renseigner la base de données à partir de fichiers bruts d'observations de 1 ou 5min à une fréquence échantillonnage d'une seconde traités avec Gipsyx.

2.9 Les laboratoires de chimie des eaux et des gaz

Les analyses chimiques sont réalisées à l'observatoire grâce à deux laboratoires performants : l'un pour l'analyse des gaz équipé d'un spectromètre de masse, et l'autre pour l'analyse des eaux équipé d'un chromatographe ionique. Même si les analyses les plus poussées sont réalisées à Paris (par exemple la composition isotopique), l'OVSG analyse sur place les composants majeurs avec une grande précision, ce qui permettra d'avoir le maximum de réactivité en cas de crise. L'entretien et le renouvellement des équipements se sont poursuivis cette année.

2.10 Systèmes de supervision automatisée

Les nombreux systèmes d'acquisition de données connectés aux réseaux informatiques de l'OVSG, à la fois dans l'observatoire et sur le terrain, nécessitent une surveillance constante pour permettre aux membres de l'observatoire de détecter au plus tôt les dysfonctionnements qui pourraient perturber les acquisitions, voire entraîner des pertes de données.

Depuis des années cette surveillance est effectuée principalement par le logiciel libre *Nagios* pour lequel nous avons développé en interne des sondes de surveillances spécifiques qui complètent les nombreuses sondes fournies avec le logiciel ou par la communauté des utilisateurs de ce logiciel.

Lorsque plusieurs tests consécutifs confirment le dysfonctionnement d'un service surveillé par Nagios, le logiciel peut alerter les responsables du système concerné (informaticiens, personne d'astreinte ou spécialiste de l'équipement) par courriel, messagerie instantanée ou, pour les cas les plus importants, par SMS.

Ces dysfonctionnements peuvent porter sur tout composant dont on peut obtenir automatiquement une information de fonctionnement. Il peut s'agir de l'état d'un équipement électronique ou informatique, ou celui de l'un de ses services (un programme fonctionnant sur cet équipement) qui peut par exemple être :

- l'état et la qualité d'une transmission (WiFi, WiMax, VSAT, Internet, etc.) ;
- le fonctionnement de systèmes d'exploitation ou de logiciels, notamment les logiciels d'acquisition tels que les outils Nanometrics, EarthWorm, SeisComp, au ceux développés par l'OVSG ;
- la production ou conversion de données en différents formats ;
- le traitement automatisé des données (par exemple pour produire des graphes facilitant leur visualisation) ;
- l'état des batteries ou d'autres paramètres de nos équipements sur le terrain.

Ce système supervise actuellement environ 1600 services sur 220 équipements.

Des graphes générés par le logiciel permettent d'observer l'évolution dans le temps des mesures effectuées dans le cadre de la surveillance de ces systèmes et services (espaces disques, qualité des liaisons réseau, tension des batteries sur le terrain, etc.).

Cet accès simplifié à l'historique des mesures facilite notamment le diagnostic des pannes ou permet d'anticiper l'évolution d'un élément d'infrastructure (par exemple la saturation d'un espace disque, la dégradation des batteries, etc.). Quelques exemples de graphes produits sont reproduits ci-dessous.



Figure 2.36 : Exemples de courbes produites par NagiosGraph : signal radio, espace disque, tension batterie

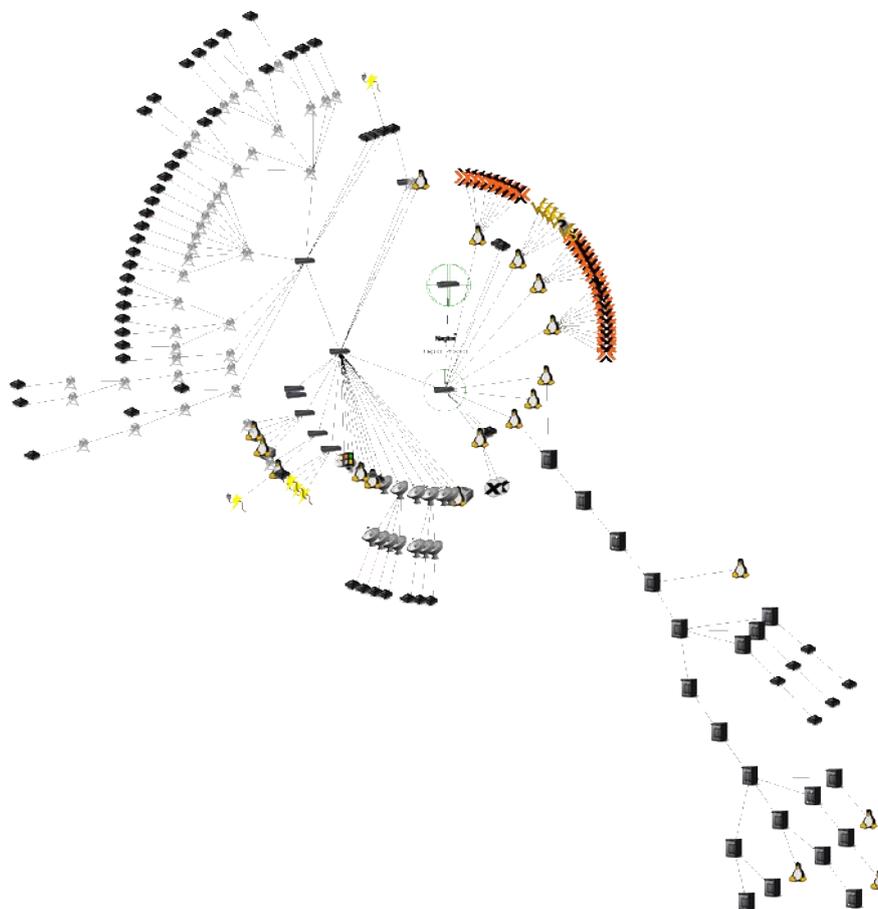


Figure 2.37 Reproduction d’une carte des réseaux informatiques générée par Nagios, faisant apparaître les équipements supervisés.

2.11 L’infrastructure informatique

L’infrastructure informatique de l’observatoire a été développée au fil des ans pour permettre à l’observatoire d’assurer ses missions de surveillance en temps réel du volcan et de la sismicité

régionale 24 h/24 et 7 j/7 en tenant compte du mieux possible des pannes matérielles et des aléas naturels pouvant entraver son bon fonctionnement.

D'importants investissements matériels ont été effectués au cours des années passées pour assurer une haute disponibilité de service : la majorité des équipements sont doublés au niveau des serveurs et baies de stockage informatiques, des équipements réseau informatiques et électriques, ou encore de la climatisation qui maintient une température et une hygrométrie optimales.

Les serveurs informatiques principaux sont agrégés en grappe sous l'environnement de virtualisation Proxmox auquel ils offrent leurs ressources en processeurs et mémoire. Les machines virtuelles qu'ils hébergent sont ainsi moins dépendantes du matériel et peuvent fonctionner malgré les pannes ou les interventions techniques, tout en exploitant au mieux les ressources matérielles des serveurs. Pour davantage de souplesse, nous avons un stockage mutualisé, qui permet notamment la migration instantanée et transparente d'une machine virtuelle en cours de fonctionnement d'un serveur physique à un autre.

Les données utilisées par ces machines virtuelles sont conservées dans des baies de stockage reliées aux serveurs par un *réseau de stockage* redondant (*SAN Fibre Channel*). Cet équipement professionnel offre un volume de stockage de données sécurisé, mutualisé et hautement disponible. En complément, deux *serveurs de stockage (NAS)* sont dédiés à la conservation de sauvegardes et de données archivées, pour lesquelles les exigences de disponibilité et de performance sont moindres.

Chaque serveur physique dispose de deux alimentations électriques indépendantes, sécurisées en amont par deux dispositifs indépendants *d'alimentation sans interruption* (dit *onduleur*) de 10 kVA. Ils fournissent une alimentation de qualité constante indépendamment de celle de l'alimentation EDF grâce à des circuits de qualité et des batteries, seule source d'énergie en attendant le démarrage automatique de notre groupe électrogène triphasé de 66 kVA qui alimentera alors tous les réseaux électriques de l'observatoire.

Pour limiter les conséquences d'un éventuel foudroiement du bâtiment de l'observatoire, les réseaux informatiques de chaque étage à câblage en cuivre sont interconnectés par des rocares de fibres optiques.

Au niveau logique, le réseau informatique est divisé en parties isolées et les accès filtrés par des règles appliquées par les pare-feu pour garantir une meilleure gestion et une meilleure sécurité des accès et des données. L'application de ces règles d'accès rend possible une ouverture restreinte et sécurisée du réseau de l'observatoire vers l'internet, permettant notamment un partage des données en temps réel avec les collègues de l'IPGP à Paris ainsi que le télétravail des membres de l'OVSG.

Cette architecture à haute disponibilité permet d'éviter que les dysfonctionnements prévisibles impactent le fonctionnement de l'observatoire, à condition qu'ils soient corrigés avant qu'un autre dysfonctionnement aggrave la situation. Afin de réagir au plus vite, nous utilisons un système de supervision constante pour assurer une détection rapide des anomalies, décrit au paragraphe « *Systèmes de supervision automatisé* ».

Évolutions informatiques en 2020

Au niveau informatique, l'année 2020 a été en bonne partie consacrée au nécessaire et constant travail de maintenance et de mise à jour de l'infrastructure système et réseau de l'observatoire et des nombreux logiciels d'acquisition et de traitement de données.

Les deux informaticiens de l'OVSG ont aussi continué à accompagner l'évolution des réseaux de surveillance du volcan en assistant les ingénieurs et scientifiques de l'observatoire dans la mise en place ou le perfectionnement des différents systèmes d'acquisition et de traitement des données.

Pendant un an, un troisième informaticien contractuel a travaillé sur le projet de mise en place d'une alerte temps réel de la déformation des flancs du volcan. En collaboration avec l'ingénieur spécialisé en déformation, il a étudié les logiciels et protocoles permettant une remontée en temps réel de la position des stations GNSS et de leur variation et a développé un logiciel complémentaire permettant la génération d'alertes en cas de mouvement anormal. Ce logiciel sera utilisé pour nos besoins de surveillance de la Soufrière, mais a également vocation à être partagé avec la communauté des ingénieurs et scientifiques travaillant dans le domaine de la déformation.

2.12 Système WebObs pour la recherche et la surveillance scientifique

L'OVSG utilise le système WebObs, initialement développé à l'OVSG par son ancien directeur François Beauducel qui continue à en assurer et en partager le développement. C'est un système aujourd'hui utilisé par plusieurs observatoires volcanologiques et sismologiques à travers le monde, et qui se présente sous la forme d'un site web interne de gestion d'observatoire.

Il permet d'automatiser ou de faciliter de nombreuses tâches effectuées dans ce type d'observatoire. Ce logiciel offre principalement les fonctionnalités suivantes :

- il permet de décrire et inventorier les caractéristiques de nos stations et capteurs et leurs évolutions, ainsi que l'historique des interventions et projets de l'observatoire ;
- des interfaces web permettent la saisie et la conservation de données relevées manuellement par les membres de l'observatoire ;
- des tâches automatisées lancées périodiquement génèrent et mettent à jour des graphes permettant la visualisation rapide des données acquises par l'observatoire ; outre une interprétation préliminaire des données, ceci permet également d'effectuer une rapide vérification de la qualité de données acquises ;
- des interfaces web complémentaires permettent d'utiliser les mêmes programmes lancés par ces tâches périodiques pour réaliser des graphes personnalisés sur un ensemble de données choisi (cette fonctionnalité est par exemple utilisée pour les cartes incluses dans les rapports mensuels publiés par l'observatoire).

Ce site web principalement interne est également un outil de collaboration externe entre l'OVSG et les personnes impliquées dans les tâches de service des Observatoires Volcanologiques et Sismologiques de l'IPGP ou aux collaborateurs de nos projets de recherche partout dans le monde.

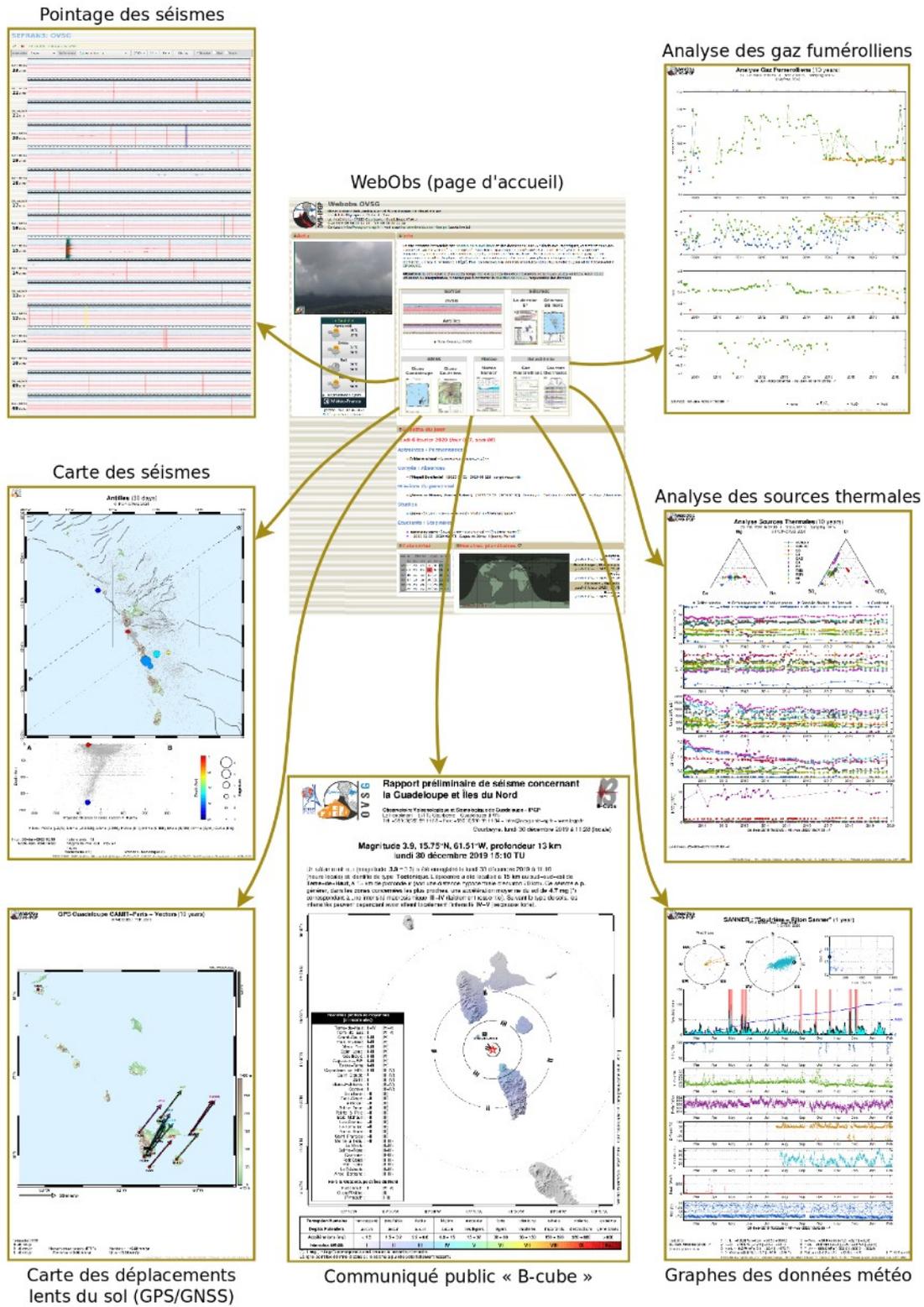


Figure 2.38 Aperçu des rendus graphiques de WebObs

3. Activités de recherche et développement instrumental

3.1 Projets de recherche

Les activités de recherche scientifique de l'observatoire correspondent à des projets auxquels un ou plusieurs membres de l'équipe de Guadeloupe a été associée (collaboration recherche, obtention de données sur le terrain...).

- ObsErA et ses activités
- Projet ANR DIAPHANE : tomographie du dôme de la Soufrière par rayons cosmiques. Coordination D. Gibert (Univ Rennes 1). Collaborations Institut de Physique Nucléaire de Lyon, OVSG-IPGP, Université Rennes 1. Financements ANR 2014-2018.
- Projet INSU-IPGP « Suivi sismologique dense du système hydrothermal de la Soufrière de Guadeloupe », 2017-2018. Coordination : A. Burtin (OVSG-IPGP).
- Projet AO-IPGP 2018 « Depth to surface propagation of fluid-related anomalies at La Soufrière de Guadeloupe volcano (FWI) : timing and implications for volcanic unrest », 2018-2019. Coordination. R. Moretti (OVSG-IPGP)
- Projet TELLUS 2020 ?
- Projet MegaMU

3.1.1 ObsErA et ses activités

L'Observatoire de l'Eau et de l'Érosion aux Antilles (ObsERA) est un service d'observation de l'INSU-CNRS consacré à l'étude de l'érosion chimique et physique, de leurs couplages et de leur impact sur l'environnement (composition des sols, chimie des rivières, flux de carbones, etc.) dans le contexte volcanique tropical des Antilles. ObsERA implique des équipes de l'Institut de Physique du Globe de Paris, de l'Observatoire Volcanologique et Sismologique de Guadeloupe, de l'Institut Universitaire Européen de la Mer (UBO) et du Laboratoire de Sciences de la Terre de l'Université Claude Bernard (Lyon). Il est également membre du Réseau de Bassins Versants de Recherche (SOERE RBV) et du Critical Zone Exploration Network (NSF).

Quatre sites appartenant à deux bassins versants (Bras-David et Capesterre) ont été instrumentés afin de suivre en continu :

- les précipitations et le débit des rivières,
- les flux de matières en suspension,
- la composition chimique (éléments majeurs en solution, éléments en trace, isotopes du strontium, carbone organique dissous et particulaire) des rivières,
- les flux liés aux dépôts atmosphériques (pluviomètres, pluvio-lessivats,...),
- la composition des solutions dans le saprolite,
- l'évolution morpho-sédimentaire des versants et du lit des rivières (granulométrie et topographie) par imagerie aérienne,
- l'évolution de la topographie fine du lit des rivières par LIDAR terrestre.

Les données acquises sont accessibles sans restriction d'accès sur le site <https://morpho.ipgp.fr/Obsera/Home>.

Le but de ce projet est de surveiller sur le long terme des bassins versants tropicaux guadeloupéens en contexte volcanique actif et dans l'écosystème préservé de la forêt tropicale du Parc National. Nous avons débuté en 2006 des suivis temporels fins de la composition chimique et du transport de matière solide (de la particule en suspension aux blocs en passant par les sables). Ce projet associe des géochimistes et des géomorphologues du transport fluvial, et depuis 2009 des botanistes de l'UAG. Ce projet a pour vocation la mise au point de nouveaux traceurs (isotopiques notamment) et de nouvelles techniques de mesure du transport fluvial et de la dynamique des versants. Cette étude s'appuie sur une collaboration avec la DEAL, le Parc National, l'Université des Antilles et l'INRA.

Chaque bassin versant recueille l'eau de pluie qui se retrouve canalisée au niveau de la rivière. Cette eau percole plus ou moins profondément à travers les sols avant d'alimenter la rivière. Ainsi, la composition chimique de l'eau de la rivière intègre l'ensemble des processus chimiques qui se produisent dans les sols du bassin. De la même manière, tous les sédiments vont être mobilisés par les eaux de ruissellement et vont atteindre la rivière. Une perturbation significative du bassin (ex. tempête ou cyclone) sera répercutée au niveau de la rivière en terme de composition chimique et de transport de sédiments. Suivre l'évolution sur le long terme des rivières permet donc d'ausculter finement l'évolution des bassins versants et de leurs écosystèmes.

Sur ces bassins, l'onde de crue associée à un événement météorologique important ne dure que quelques heures. L'étude précise de ces événements exige donc l'installation d'équipements adaptés comme des préleveurs d'eau automatiques couplés à des capteurs de hauteur d'eau ainsi que des appareils mesurant la concentration et la granulométrie du matériel solide transporté (Figure). La station automatique de la Grande Rivière de Capesterre est opérationnelle depuis août 2007, quelques jours avant le passage du cyclone DEAN.

3.1.2 Projet ANR « DIAPHANE » et son évolution

Radiographier la Soufrière avec les rayons cosmiques

La Soufrière de Guadeloupe est le « volcan laboratoire » du groupe de recherche DIAPHANE qui développe une méthode utilisant des rayons cosmiques pour radiographier les volcans. Le groupe est co-dirigé par Dominique Gibert et Jacques Marteau et comprend des chercheurs et ingénieurs de l'OSU de Rennes, de l'Institut de Physique Nucléaire de Lyon et de l'IPGP/OVSG. Il est reconnu comme l'un des deux groupes leaders mondiaux dans le domaine de la tomographie par muons cosmiques.

La méthode utilise les muons produits lors des interactions entre les rayons cosmiques primaires et la haute atmosphère. Une « pluie » de muons arrose en permanence la surface de la Terre¹, dans toutes les directions, du zénith jusqu'à l'horizontale. À l'instar des rayons X qui traversent le corps humain, les muons les plus énergétiques peuvent traverser des épaisseurs de roche de plusieurs kilomètres. Des détecteurs de particules (Figure) placés au pied du volcan mesurent le flux de muons le traversant et dont l'atténuation dépend de la densité des roches. Les radiographies sont des images de la densité des différentes parties de l'édifice volcanique.



Figure 3.1 : Téléscope « débâché »

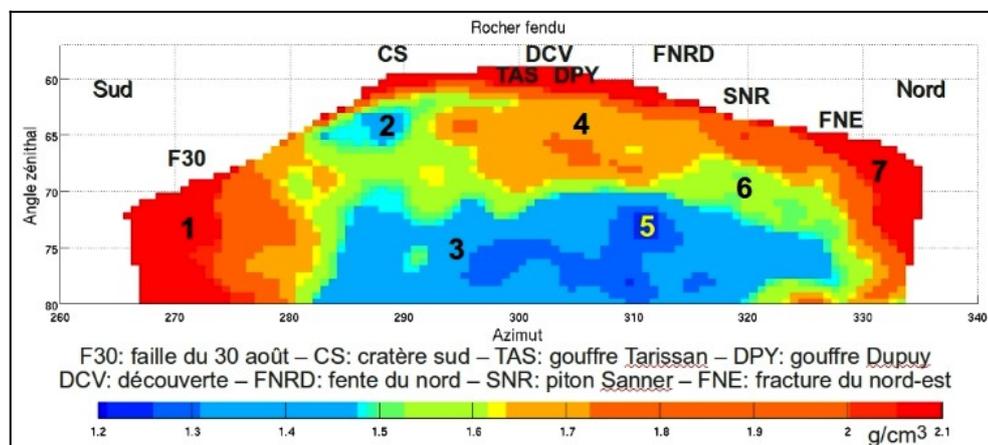


Figure 3.2 : Radiographie de la Soufrière selon un axe sud-nord. Les zones les plus denses sont en rouge.

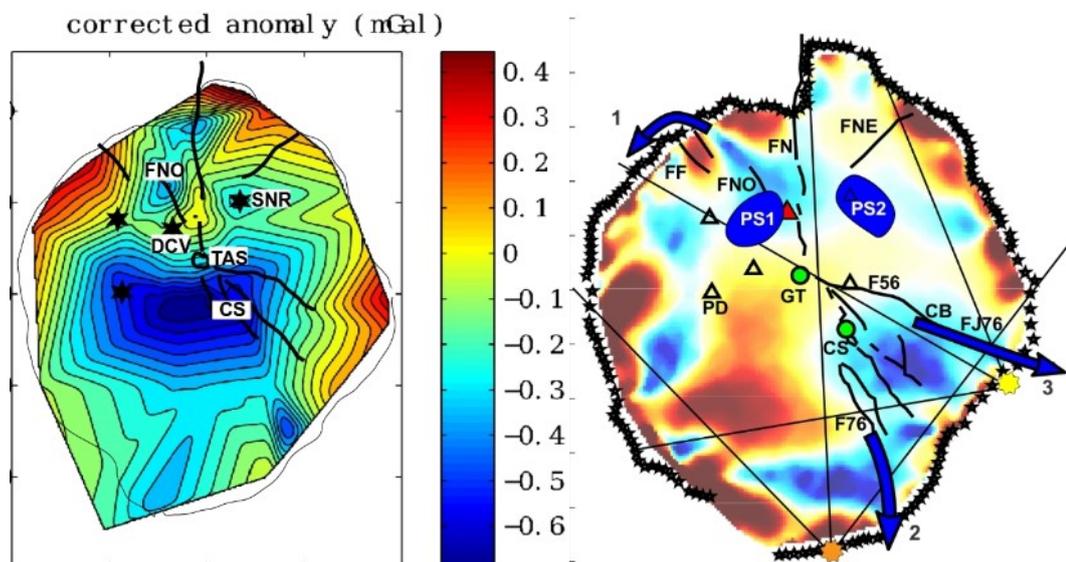
1— En moyenne, un centimètre carré de la surface terrestre est frappé par un muon chaque minute.

Appliquée sur la Soufrière dès 2010, la méthode a révélé l'hétérogénéité de la Soufrière qui est une juxtaposition de blocs de roches denses séparés par des volumes remplis de matériaux peu denses et comportant vraisemblablement de nombreuses cavités. L'une de ces zones s'étend du cratère sud (N°2 Figure ci-dessous) et une autre est située sous le gouffre Dupuy (N°3 Fig) et la Fente du Nord (N°5 Fig). Une zone de densité intermédiaire est située sous le piton Sanner (N°6 Fig). Les zones denses correspondent à des escarpements d'andésite visible sur le terrain : secteur de la faille du 30 août (N°1 Fig) et flanc nord et nord-est du dôme (N°7 Fig).

Le groupe réalise d'autres études géophysiques complémentaires de la tomographie par muons : gravimétrie, tomographie électrique, mesures sismiques et acoustiques. L'analyse conjointe de ces différents types de données permet l'élaboration progressive d'un modèle de structure et de fonctionnement du dôme.

La gravimétrie consiste à cartographier le champ de pesanteur pour en déduire la densité du sous-sol, elle a fait l'objet de plusieurs études en 2014. La complémentarité de la gravimétrie et de la tomographie par muons tient au fait que celle-ci fournit des images détaillées du dôme mais ne montre rien en dessous alors que la gravimétrie apporte des informations sur la densité des zones profondes. Ces travaux théoriques sur l'analyse conjointe de radiographies par muons et de mesures gravimétriques ont permis de calculer les noyaux résolvants qui quantifient la façon dont les radiographies « concentrent » l'information gravimétrique dans les zones profondes et en améliorer l'imagerie (*Jourde et al.* 2015).

Des campagnes de mesures gravimétriques ont été réalisées grâce à des financements du LabEx UnivEarthS de l'IPGP et du programme ALÉAS-2014 de l'INSU². Malgré des conditions météorologiques difficiles, plus d'une centaine de sites de mesure ont été relevés avec une précision quatre fois meilleure que celles des dernières mesures faites au début des années 2000. La carte des anomalies gravimétriques (Figure) montre que la moitié sud du plateau sommital du volcan est moins dense que la partie nord qui comporte cependant deux petits secteurs moins denses : au nord-ouest vers l'éboulement Faujas (FNO) et au nord-est sous le piton Sanner (SNR).



2— Appel d'offres INSU 2014-ALEAS, projet « Tomographie combinée de la Soufrière de Guadeloupe : radiographies par muons cosmiques, gravimétrie et résistivité électrique », 8000 € HT, resp. D. Gibert.

Afin de compléter l'étude gravimétrique, les mesures de résistivité électriques datant de 2004 ont été réanalysées et réparties sur toute la circonférence de la Soufrière (*Lesparre et al.* 2014). La coupe horizontale de la structure en conductivité électrique du dôme qui a été calculée (Fig 29) est en très bon accord avec les radiographies par muons et la cartographie gravimétrique : présence d'une zone très conductrice dans le secteur sud et de deux volumes conducteurs en face de l'éboulement Faujas (FNO) et sous le piton Sanner.

En 2014, plusieurs expériences de tomographie par muons ont été consacrées à la détection et au suivi temporel de variations de densité dans certaines parties volcan. De telles variations avaient déjà été détectées fin 2011 au moment de l'apparition de fumerolles dans le secteur du Gouffre 56. Une grande partie de l'année a été consacrée à l'amélioration de la méthode de monitoring (*Marteau et al.* 2014). À l'aide d'un télescope basé au parking de la Savane à Mulets, de nettes variations de densité ont été détectées dans deux secteurs :

- Pendant le premier trimestre 2015, une augmentation de densité est observée dans une zone s'étendant du gouffre Tarissan au cratère sud.
- Dans la même période, c'est une baisse de densité qui est observée dans un volume relativement étroit allant du sommet à la base du dôme. Ce volume est dans l'axe du cratère Napoléon où de nouvelles fumerolles sont apparues pendant l'été 2014.

Ces variations de densité sont attribuables à des mouvements de fluides : remplissage ou vidange d'aquifères superficiels, passage en phase vapeur d'une fraction des fluides.

Le projet de recherche³ soumis par le groupe au printemps 2014 à l'Agence Nationale de la Recherche a été sélectionné pour un financement de 5 ans (oct. 2014 – oct. 2019). Ce nouveau projet va permettre la poursuite des travaux sur la Soufrière grâce à l'installation de trois télescopes supplémentaires et l'implantation d'un réseau de capteurs (géophones, thermocouples, capteurs acoustiques, etc.) dans les zones actives du sommet.

Le projet Diaphane va évoluer dans le projet ANR MegaMUn qui verra son vrai début en 2021.

3.4 Projet AO IPGP « Depth to surface propagation of fluid-related anomalies at La Soufrière de Guadeloupe volcano (FWI) : timing and implications for volcanic unrest »

Le projet vise à développer une recherche coordonnée et multidisciplinaire au niveau de l'Observatoire unique (OVSG), l'objectif final étant de franchir une étape décisive dans les études de pointe en matière de gaz volcanique / hydrothermal. L'idée est de combiner les innovations technologiques et les efforts de modélisation dans le but ultime de :

(i) affiner les techniques existantes et mettre en place de nouvelles techniques intégrées innovantes pour l'observation en temps réel à haut débit (jusqu'à 1 Hz) des émissions de gaz volcaniques / hydrothermales et de chaleur. En particulier, nous proposons de :

— Concevoir et assembler de nouvelles stations d'essence multicomposantes maison, basées sur une technologie robuste et économique et une conception très compacte pour le CO₂, le H₂ ; HCl, SO₂, H₂S.

— Sites fumerolles avec stations automatiques pour la mesure en temps réel des flux thermiques proches de la surface, mesurant les gradients thermiques proches de la surface par insertion de thermocouples (par exemple, Pt1000, avec une résistance en fonction de la température) à différentes profondeurs dans le sol (10 à 100 cm) ;

(ii) promouvoir une intégration systématique et quantitative du gaz volcanique et des données géophysiques. Nous prévoyons d'analyser nos séries chronologiques à haute fréquence dérivées

3— Projet ANR-14-CE04-0001, « IMAGERIES STRUCTURELLE ET FONCTIONNELLE DE VOLCANS AVEC DES RAYONS COSMIQUES », resp. D. Gibert (OSU Rennes), co-resp. J. Marteau (IPNL) & C. Dessert (IPGP/OVSG).

pour les flux de H₂S, SO₂, CO₂, H₂ et HCl en parallèle avec les acquisitions sismiques et thermiques co-acquises (imagerie infrarouge du panache, caractérisation thermique par les tubes de Pitot, gradients de température du sol), GPS aussi données météorologiques.

(iii) utiliser les observations gazeuses géophysiques et volcaniques en tandem ci-dessus sur le volcan La Soufrière pour limiter les mécanismes de source contrôlant la production et l'irradiation de l'énergie sismique, pour évaluer le moment de la propagation en profondeur / vers la surface des anomalies de ressuage liées au fluide et enfin obtenir des contraintes fondamentales dans les processus volcaniques pré-éruptifs à sin-éruptifs, qui peuvent être utilisés pour affiner / mettre en œuvre des modèles de flux gaz-magma à partir de régions profondes de stockage de magma jusqu'au système hydrothermal peu profond.

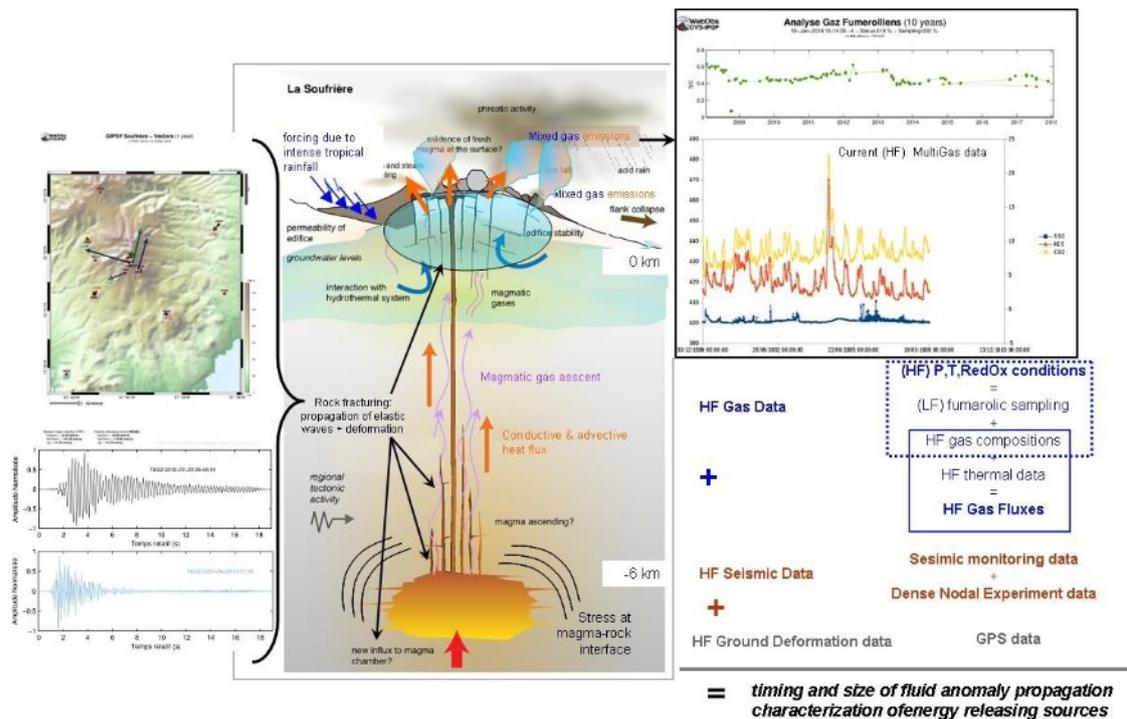


Figure 3.4 : Schéma récapitulatif (modifié par Hinks et al., 2014) du volcan La Soufrière, soulignant les processus en cours et le type de données générées et acquises par les stations et réseaux OVSG actuels. En bas à droite de la figure, nous reportons « l’algèbre de collecte de données » requise par le projet.

3.5 Projet INSU-IPGP « Suivi sismologique dense du système hydrothermal de la Soufrière de Guadeloupe »

Ce projet IPGP/INSU (responsable : A. Burtin) a pour objectif d'étudier, à très haute-résolution spatiale et temporelle, l'activité superficielle du système hydrothermal. Pour y parvenir, un réseau de 65 capteurs sismologiques (géophones 3 composantes) a été déployé de novembre 2017 à janvier 2018 (Fig. 3.5). La partie du dôme instrumentée est localisée sur le flanc sud du volcan (le bulge ou bombement) et présente de nombreuses anomalies géophysiques indiquant la présence de roches fortement altérées et/ou riche en fluides avec une faible résistance mécanique. L'ensemble de ces caractéristiques indiquerait que cette partie est un point de faiblesse dans le cas d'une déstabilisation de flanc (glissement de terrain). Pour ce projet, les tâches de travail se concentrent sur plusieurs axes d'étude et comprennent : (1) une caractérisation et localisation de la microsismicité du dôme (séismes volcanique), (2) une imagerie en 3-D de la structure du dôme, (3) une imagerie de la circulation des fluides dans les parties supérieures du système, et (4) une étude des forçages interne et externe sur l'activité du système hydrothermal. Le taux de recouvrement de l'expérience (pourcentage des données acquises exploitables) est proche de 100 %.

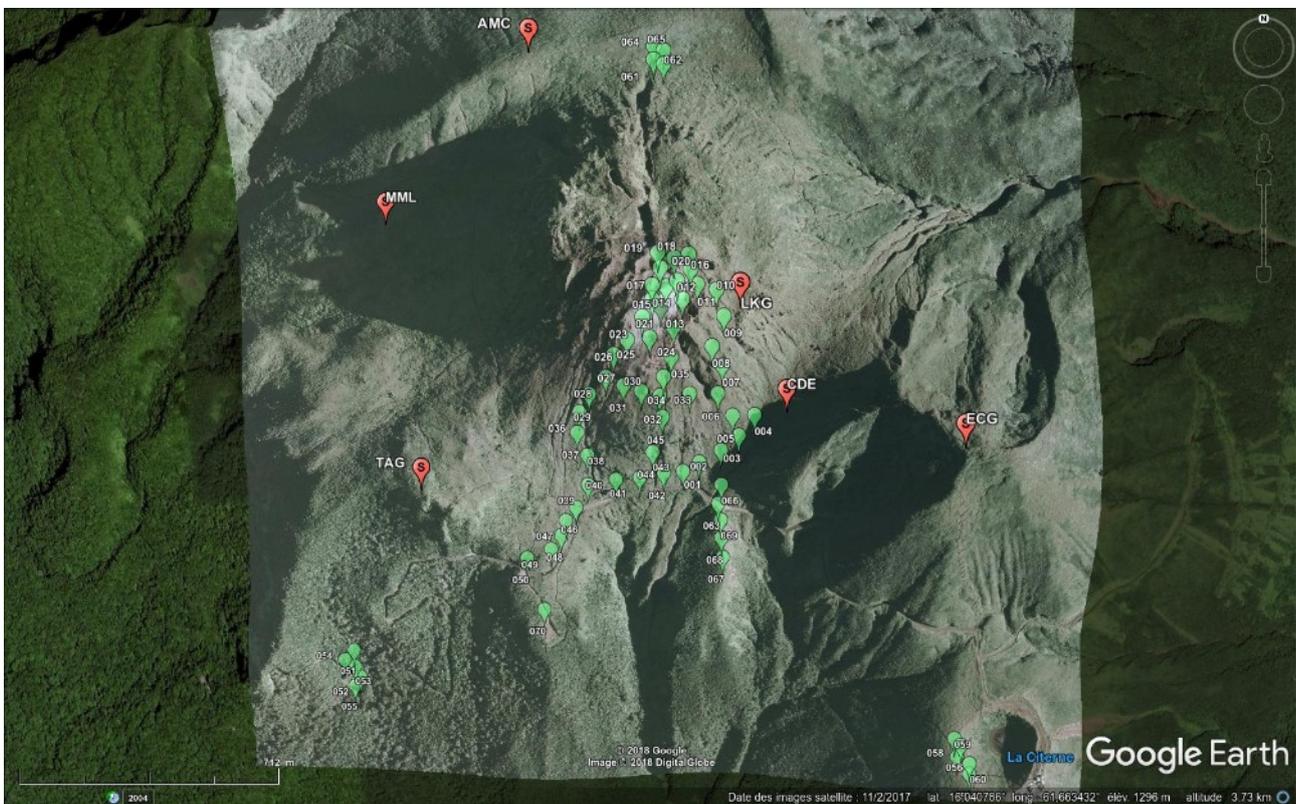


Figure 3.5 : Carte du réseau temporaire de 65 géophones (en vert) déployé sur le bulge pour une période de 2 mois. Les stations sismologiques permanentes de l'OVSG (en rouge) complètent l'étendue spatiale de cette expérience. Noter la forte densité de capteurs sur la partie sud du dôme.

Premiers résultats :

La caractérisation spectrale des enregistrements sismiques continus faite pour l'ensemble des géophones du réseau temporaire montre l'existence d'un signal cohérent est visible dans une fine gamme en fréquence autour de 4 Hz (Fig. 3.6). Ce bruit ambiant pourrait avoir pour origine la circulation de fluide à l'intérieur du système hydrothermal.

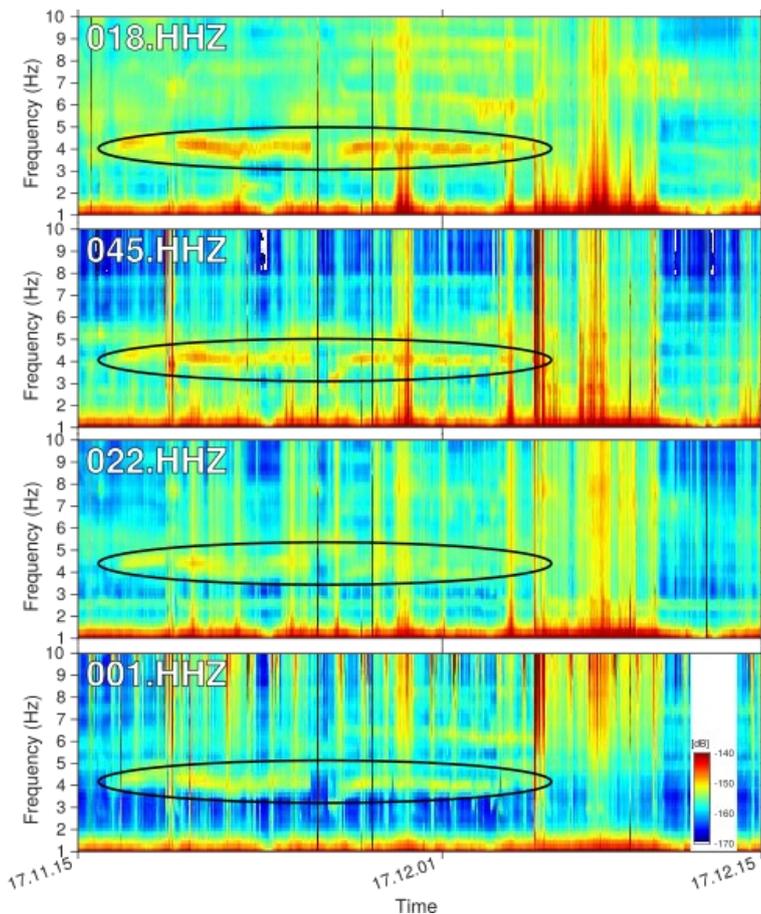


Figure 3.6 : Énergie sismique en fonction du temps (horizontal) et de la fréquence (vertical) pour un échantillonnage de 4 capteurs installés du sommet à la base du dôme. Un zoom sur la période mi-novembre à mi-décembre 2017 et de la bande en fréquence 1-10 Hz est représenté. Les couleurs chaudes montrent un niveau d'énergie sismique élevé. Il faut noter la présence d'un signal sismique cohérent dans le temps et l'espace à l'ensemble des stations de ce réseau (ellipse noire autour de 4 Hz).

La localisation de ce signal sismique par une technique de corrélation de bruit dans le domaine temporel, migration de la cohérence temporelle dans l'espace, permet d'obtenir une image de l'activité interne du dôme. La Figure 3.7 montre que le signal sismique observé provient d'une zone située à l'aplomb du gouffre Tarissan et d'un conduit issu de cette zone pointant et arrivant en surface au niveau de Cratère Sud. Ce résultat est cohérent avec la caractérisation faite en surface des fumerolles (vitesse, flux, température...). Cette image est le résultat d'une intégration faite sur la période du déploiement (environ 2 mois). Pour mieux cibler la dynamique de ces sources de circulation de fluide, la même approche sera testée à court terme sur de petites périodes de temps (quelques jours). La dynamique et l'interaction des différentes sources de circulation de fluide seront éventuellement caractérisées.

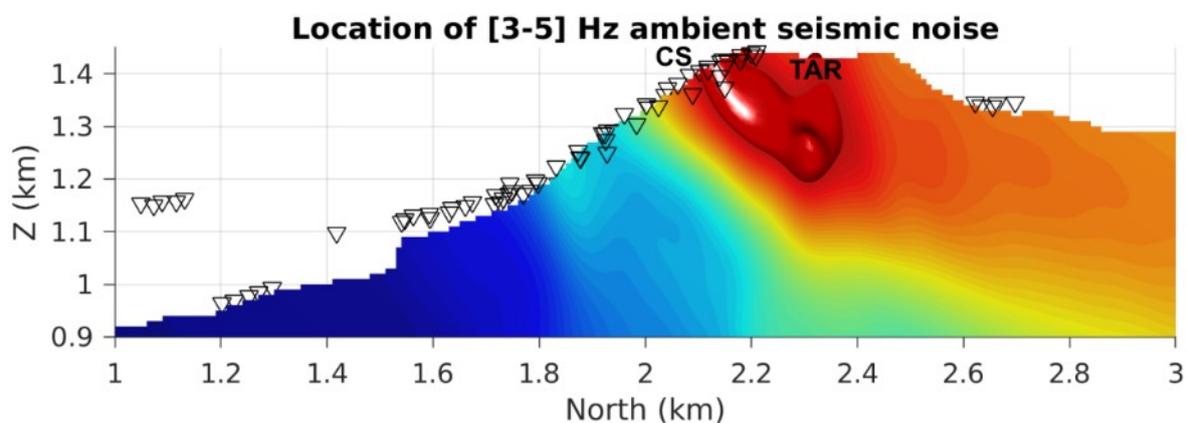


Figure 3.7 : Localisation du bruit sismique ambiant généré à 3-5 Hz par l'activité du système hydrothermal de la Soufrière de Guadeloupe. Une coupe sud-nord passant par le gouffre Tarissan est représentée. Le volume rouge marque la zone de plus forte probabilité dont origine le signal sismique. Il est présumé être produit par la circulation de fluide. Les positions des stations du réseau temporaire sont marquées par un triangle inversé.

3.6 Développement instrumentaux

L'arrivée en 2017 d'un ingénieur en instrumentation à l'observatoire a permis de développer des instruments spécifiques à nos besoins.

L'ensemble des développements effectués peut être présenté sous forme d'une plate-forme de développement intégrant les aspects de conception mécanique, électronique et informatiques nécessaires à la conception de nouveaux instruments de mesure : Le framework Megazord

Le framework Megazord

Objectifs :

Le projet (AO IPGP 2018) est arrivé à l'observatoire avec le besoin de développer différents nouveaux systèmes de mesure. Cela a été l'occasion de mettre en place un nouveau framework, baptisé Megazord, encadrant la conception de nos boîtiers d'instrumentation.

Ce framework cherche à rationaliser les développement en maximisant les éléments communs dans nos boîtiers et à permettre la réutilisation des éléments déjà conçus.

Cela a pour but de simplifier et/ou d'accélérer :

- la conception
- la production
- la maintenance
- la gestion des stocks de pièces de rechanges

Ce framework concerne l'ensemble des éléments à prendre en compte lors d'un nouveau projet, depuis l'intégration mécanique à l'informatique embarquée, en passant par la connectique ou même la visserie.

Nous nous attarderons plus spécifiquement dans les deux paragraphes suivants sur deux de ces composantes.

Intégration mécanique et impression 3D :

Impression 3D :

L'impression 3D a fait son entrée début 2019 à l'observatoire avec l'arrivée d'une imprimante FDM (*Fused deposition modeling – Dépôt de fil fondu*). Il s'agit d'une Prusa I3 mk3 qui permet d'imprimer des pièces dans un volume maximal de 21x25x21 cm dans une grande variété de polymères.

En un an, cette imprimante a fonctionné 580 heures en cumulé, soit l'équivalent de 24 jours. C'est donc un outils particulièrement sollicité dont voici les principales utilisations :

- Intégration mécanique des boîtiers d'instrumentation
- Réalisation de pièces spécifiques en tous genres pour les stations ou l'observatoire

— Réalisation de pièces pour réparations diverses et variées

Pour toutes les pièces non soumises aux éléments climatiques, nous utilisons principalement le PLA. Ce matériau a l'avantage d'être peu coûteux (à partir de 20 euros du kg), très facilement imprimable, et biodégradable en compost industriel ($T^{\circ}\text{C} > 60^{\circ}\text{C}$). Pour les pièces directement soumises à un environnement extérieur, nous utilisons pour l'instant le PETG ou l'ABS.

Côté logiciels, nous réalisons principalement nos conceptions sur freeCAD (logiciel open-source), et le tranchage avec PrusaSlicer (fourni par le fabricant de l'imprimante).

Les bénéfices d'une imprimante 3D à l'observatoire sont aujourd'hui les suivants :

- Le court délai entre le début de la conception et l'obtention de la pièce finale
- La possibilité de mettre au point une pièce en plusieurs itérations rapides
- La facilité de produire des pièces précises sur mesure
- La possibilité de produire nous même ces pièces
- La reproductibilité des pièces
- Le faible coût de revient des pièces

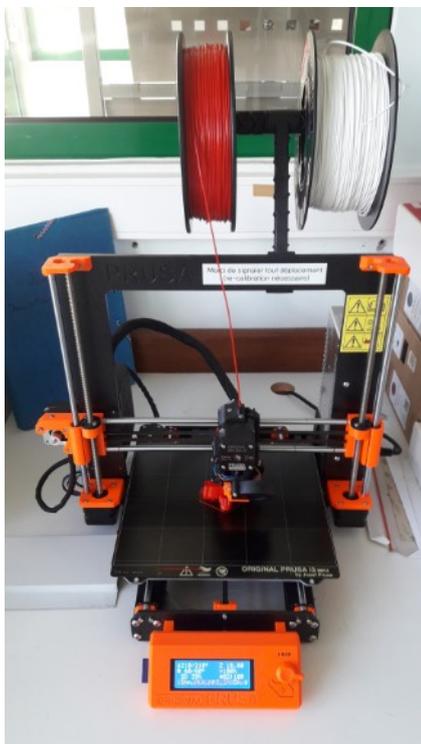


Figure 3.8: L'imprimante 3D de l'observatoire

Intégration mécanique des boîtiers :

L'intégration mécanique des nouveaux boîtiers fait très largement appel à l'impression 3D.

Pour permettre la modularité des pièces conçues, Megazord s'appuie sur deux éléments :

- Une **grille de fond**. Cette dernière est propre à chaque modèle de boîtier. Elle épouse donc les dimensions du boîtier, mais se doit de respecter un motif commun à toutes les grilles.
- Des **satellites** : Les satellites sont les éléments dont la fixation est compatible avec le motif des grilles de fond. Le plus souvent, ils servent eux-même de support à une carte électronique, un capteur, des câbles,...

Il faut donc dessiner une grille de fond pour chaque modèle de boîtier, et un satellite pour chaque élément que l'on souhaite intégrer. Mais une fois que cela est fait, nous pouvons réutiliser n'importe quel satellite dans n'importe quel boîtier. Et plus la « banque » de satellites et de grilles se complète, moins il sera nécessaire de dessiner de nouveaux éléments.

L'informatique embarquée :

Côté hardware :

Du côté du PC embarqué, nous travaillons actuellement sur Beaglebone Black (processeur Arm Cortex A8), sous Debian 9. La couche d'abstraction offerte par l'OS nous permet donc d'être relativement peu lié au matériel, et il sera donc possible de faire évoluer ce dernier dans l'avenir, indépendamment des développements logiciels.

L'utilisation du « device tree » pour décrire le matériel utilisé nous permet de nous affranchir un peu plus d'une dépendance à la plateforme utilisée.

Côté software :

Une part importante de l'activité de l'observatoire est la surveillance sismique. A l'Observatoire, nous utilisons la suite logicielle Seiscomp3 pour l'archivage, les traitements automatiques et manuels, la distribution, et l'affichage de ces données. Seiscomp3 s'appuie sur l'utilisation du protocole SeedLink pour la transmission des données.

Or, le SeedLink peut aussi être utilisé pour d'autres types de données, à partir du moment où il s'agit de séries temporelles à échantillonnage constant, et que la station qui les produit est fixe.

Ainsi, ce protocole s'est imposé pour les stations Megazord. Cela permet d'utiliser directement les outils de Seiscomp3 pour les différentes tâches listées plus haut, en limitant ainsi les besoins propres en développement.

Afin de rendre la production des données en Seedlink plus aisée, nous avons développé deux plugins Seedlink (« moulinettes » permettant la conversion de données d'un format source vers le seedlink).

Ces deux plugins se veulent particulièrement généralistes, et l'objectif est de pouvoir les réutiliser dans une multitude de projets sans avoir à retoucher au code. Le côté technique ne sera pas plus développé dans ce document.

Ces plugins ont été présentés dans différentes rencontres internationales au cours de l'année 2019 (REFMAR à Paris, Kick-off PREST en Martinique, Rencontres multigas à la Réunion), et ils seront mis à disposition de l'ensemble de la communauté au cours de l'année 2020.

Les implémentations :

Différents projets de l'année 2019 se sont déjà appuyés sur ce framework. Voici un rapide descriptif de ces derniers :

Projet RANTANPLAN :

Premier de la liste, le projet RANTANPLAN tend à la mise en place d'un dispositif robuste de mesures continues de concentrations de différents gaz au sommet de la Soufrière.

Ce projet est décliné en deux versions : station permanente, ou dispositif mobile.

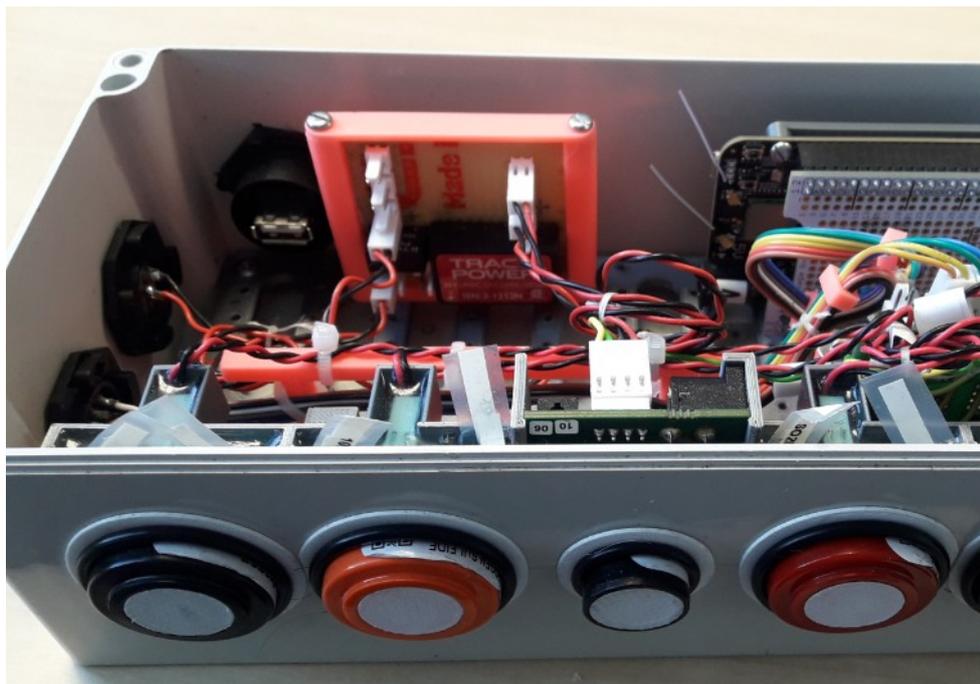


Figure 3.9: Prototype mobile du projet RANTANPLAN

Projet BUFFY :

Le projet Buffy consiste en une valisette accompagnée de différentes « cannes » de mesure thermique. Ces cannes sont des sortes de grands clous de différentes tailles (de 25 à 100 cm) dont l'extrémité est équipée d'un capteur de température.

L'objectif est d'avoir un dispositif mobile permettant de faire rapidement une cartographie thermique d'une zone telle que le plateau sommitale, et ce pour différentes profondeurs.

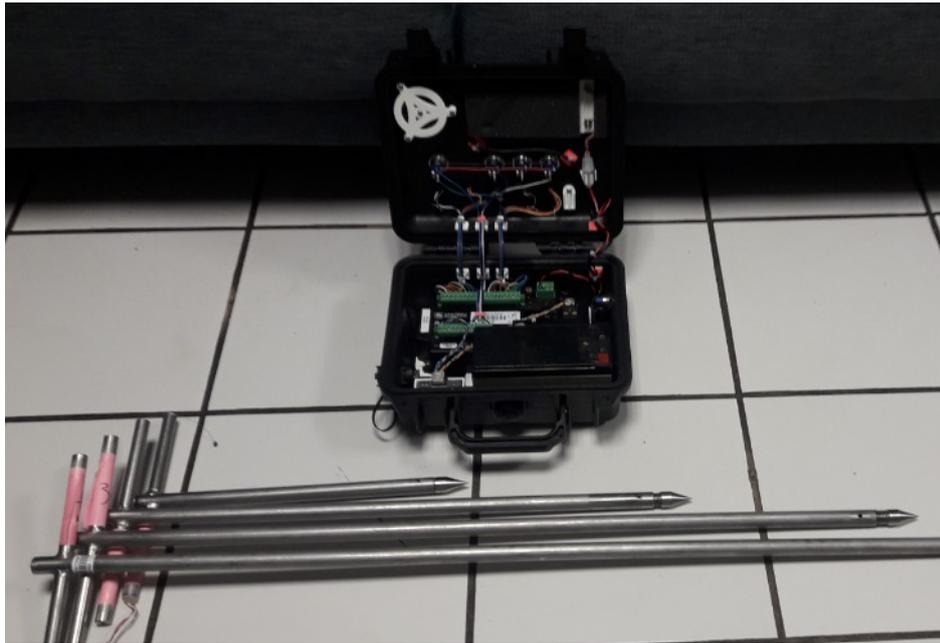


Figure 3.10: Valisette et cannes du projet BUFFY

Projet SHIRYÛ :

Il s'agit d'une station permanente de mesures des températures du sol. Elle est équipée d'une « canne thermique » enterrée permettant de mesurer les températures tous les 20 cm entre 1 m de profondeur et la surface. A cela viennent s'ajouter trois sondes Pt100 qui confirmeront les mesures de la canne et prendront le relais en cas d'élévation de température trop importante. Enfin une station météo permettra de décorréliser les influences dues aux conditions climatiques.



Figure 3.11 Canne, boîtier, et station météo du projet SHIRYÛ

Projet ZEPHIRIN :

Ce mini PC n'a d'autre but que de convertir en SeedLink les données d'une station Campbell (numériseur/enregistreur souvent utilisé à l'observatoire) déjà existante et de gérer la

transmission de ces données vers l'observatoire. La première station qui bénéficiera de ce dispositif est la station marégraphique de Deshaies.

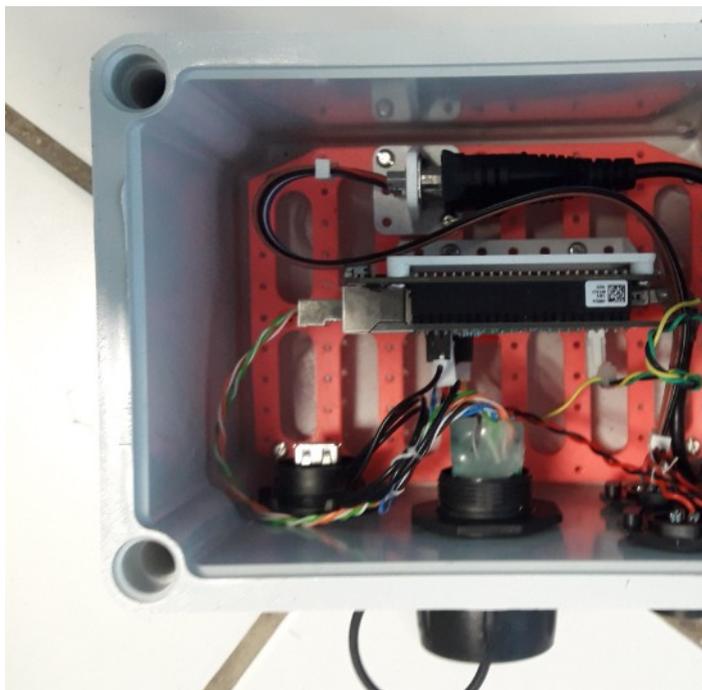


Figure 3.12: Vu intérieur d'un boîtier ZEPHIRIN

d

4. Activités d'enseignement et de formation

4.1 Activités pédagogiques

Dans la mesure de ses disponibilités, le personnel de l'observatoire participe aux actions d'enseignement, de formation et d'éducation en Sciences de la Terre. Cependant il faut remarquer que le pandémie COVID a comporté l'annulation de plusieurs rendez-vous prévus pour 2020. L'OVSG a donc participé à la seule initiative de la **Fête de la Science**, tenue en distanciel du 8 au 10 décembre. L'OVSG a aussi été aussi membre du CoPil pour l'organisation de la Fête de la Science

4.2 Interventions dans les médias

Aussi durant l'année 2020, l'OVSG a été sollicité par la presse écrite et les médias radio et télévisuels pour intervenir sur l'activité tellurique, surtout l'activité sismique. On cite par exemple les interventions demandées pour les séismes de Porto Rico en début d'année, l'« exercice séisme » de Novembre 2020 et enfin le début de la crise volcanique e St Vincent en fin d'année .

4.3 Visites officielles – Comités

La pandémie COVID 19 a eu un impact considérable, réduisant grandement les initiatives et activités prévues. Il faudra donc juste rappeler trois moments marquants :

- 14 février : visite du Conseil d'État et de son Président
- 24 Novembre : Exercice « Séisme » avec la Préfecture et le SIDPC), simulant la gestion de crise pour un séisme de M 6 (et ses répliques) en proximité de la côte Guadeloupéenne.
- 25 Novembre : réunion des experts scientifiques avec nos confrères de l'OVSM-IPGP pour discuter des changements de régime observés à la Montagne Pelée (Martinique) et communication à faire suivre (Le 4 décembre la Pelée passera en « jaune »)

4.4 Missions et stages

Missions à l'OVSG

Au cours de l'année 2020, la pandémie a joué le rôle de supprimeur des activités de collaboration, empêchant aux chercheurs, ingénieurs ou doctorants de l'IPGP, d'universités ou de laboratoires français et étrangers, de venir comme d'habitude à passer de quelques jours à quelques semaines à l'observatoire.

Dans la cadre des mois invités IPGP :

- Geoff Kilgour (GBS, New Zealand) ; 1 mois (janvier 2020)

Dans le cadre de missions techniques concernant le fonctionnement de l'Observatoire :

- Jean-Bernard de Chabalière (IPGP), 15 jours pour campagne GNSS
-

Dans le cadre du **comité de liaison** (4-6 mars 2020) : Marc Chaussidon (IPGP), Anne Lefriant (IPGP), Pjean-Christophe Komorowski (IPGP), Antoine Charlot (IPGP), Arnaud Lemarchand (IPGP), Stéphanie Guillot (CNRS-INSU)

Stages à/de l'OVSG

L'effet négatif de la pandémie est aussi visible sur l'accueil des stagiaires en Observatoire, avec une présence très faible en 2020 :

- Tommaso Boni (Univ. Antilles, Erasmus de l'Università di Torino, Italie ; niveau L3) du 9 janvier au 18 février (réfèrent : Roberto Moretti)
- Emile Gros (Univ. Sorbonne , niveau M2; réfèrents : R. Moretti et V. Robert) du 29 février au 25 juin, mais seulement jusqu'au 16 mars à l'OVSG
- Jessy Lossel (IPGP-Univ. Paris ; niveau M1) : de Mars à Mai 2020 (réfèrent : David Jessop)

4.5 Thèses encadrées par les chercheurs OVSG-IPGP

Sarah Aufrère (2020-2024) - Titre: « Insights into magmatic processes timescales occurring at GVB volcanoes, Canada », Encadrement : 50% (co-encadrement : Glyn Williams-Jones, SFU, Canada). Thèse en cotutelle UCA-SFU (en cours de validation).

Abigail Metcalfe (2018-2021) - Financement "Make Our Planet Great Again (MOPGA)". Encadrement = 40% (60% = J.C. Komorowski, IPGP). Titre: " Insights into the origin and dynamics of past eruptions of La Soufrière de Guadeloupe from melt inclusions: implication for future unrest and environmental impact "

Étienne Le Glas (2019-2022) – Financement École doctorale IPGP & Paris 7. Encadrement = 70 % M. Bonifaci (30 % = P. Agrinier, IPGP).
Titre : "Développement d'un nouveau traceur en volcanologie : les isotopes stables du chlore pour quantifier l'activité magmatique et/ou hydrothermale des volcans "

Chagnon Glynn (2020-2023) – Financement Idex Univ. Paris (contrat doctorants internationaux) l'École doctorale IPGP & UP. Encadrement = 80 % R. Moretti (20 % = M. Rosas-Carbjal, IPGP).
Titre : "Physical Geochemistry of a Volcanic Island Hydrothermal System (Guadeloupe, Lesser Antilles): Sources, Dynamics and Precursors of Volcanic Activity"

Salomé Pannefieu (2020-2023) École Doctorale 560 STEP'UP. Encadrement : 30% en tant que co-directeur (Directeur ; D. Neuville, IPGP ; co-encadrant : C. Le Losq, IPGP). Titre : « Fluorine and chlorine in glass and melt : implication for volcanology and new-materials », Soutenance prévue en 2023

4.6 Publications – Congrès 2020

Articles dans revues à comité de lecture (rang A)

Publication de rang A

1. Metcalfe, A., Moune, S., Komorowski, J.C., Kilgour, G., Jessop, D., Lgendre, Y., Moretti, R., *Magmatic processes at La Soufrière de Guadeloupe : Insights from crystal studies and diffusion timescales for eruption onset*, *Frontiers*, in press.
2. Jessop, D. Moune, S., Moretti, R., Gibert D., Komorowski J.C., Robert V., Bosson A., Bonifacie M., Burtin A., Deroussi S., Dessert C., Heap, M.J., Lemarchand A. and Rosas-Carbajal, M., 2020, *A multi-decadal view of the heat and mass budget of a volcano in unrest: La Soufrière de Guadeloupe (French West Indies)*, *Bull. Volc.*, in press.
3. Saurel JM, Corbeau J, Deroussi S, Didier T, Lemarchand A, Moune S., Lynch L., Le Jeune AM, Moretti R, Komorowski J.C., 2020, *Building a natural-hazard resilient high-quality seismic network: how WI network sustained hurricanes Maria and Irma*, *Seismological Research Letters*, in press.
4. Moretti, R., Moune., S., Robert, V., Jessop, D.E., Didier, T., Bonifacie, M., Komorowski, J.-C., 2020, *Intercomparison of geochemical techniques at La Soufrière de Guadeloupe (FWI) volcano: their advantages and their limits over a long-standing unrest*, *Italian Journal of Geosciences*, <http://doi.org/10.3301/UG.2020.13>
5. Sigmarrson, O., Moune, S., Gauthier, P.J., 2020, *Fractional degassing of S, Cl and F from basalt magma in the Bárðarbunga rift zone, Iceland*, *JVGR*, 82, 54.
6. Venugopal, S., Schiavi, F., Moune, S., Bolfan-Casanova, N., Druitt, T., Williams-Jones, G., 2020, *Melt inclusion vapour bubbles: the hidden reservoir for major and volatile elements*, *Nature Scientific Reports*, doi 10.1038
7. Sainlot, N., Vlastélic, I., Nauret, F., Moune, S., Aguilera, F., 2020, *Sr-Pb isotopes signature of Lascar volcano (Chile) : Insight into contamination of arc magmas ascending through a thick continental crust*, *J. South Amer. Earth Sci.*, 101, 102599.
8. Sainlot, N., Vlastélic, I., Moune, S., Rose-Koga, E., Schiavi, F., Aguilera, F., 2020, *Uptake of gaseous Thallium, Tellurium and Vanadium into fumarole alums and implication for trace metal degassing (Lascar volcano, Chile)*, *GCA*, 275, 64-82.
9. Moretti R., Komorowski J.C., Ucciani G., Moune S., Jessop D., de Chaballier J.B., Beauducel F., Bonifacie M., Burtin A., Vallée M., Deroussi S., Robert V., Gibert D., Didier T., Kitou T., Feuillet N., Allard P., Tamburello G., Shreve T., Saurel J.M., Lemarchand A., Rosas-Carbajal M., Agrinier P., Le Friant A., Chaussidon M., 2020, *The 2018 unrest phase at La Soufrière of Guadeloupe (French West Indies) andesitic volcano: Scrutiny of a failed but prodromal phreatic eruption*, *JVGR*, 393, 106769
10. Venugopal, S., Moune, S., Williams-Jones G., Druitt, T., Vigouroux, N., Russell, J.K. and Wilson, A., 2020, *Two distinct mantle sources beneath the Garibaldi Volcanic Belt: insight from olivine-hosted melt inclusions*, *Chem. Geol.*, 532, 119346
11. Anderson N.T., Kelson J.R., Kele S., Daëron M., Bonifacie M., Horita J., Mackey T.J., John., C.M., Kluge T., P. Petschnig, Jost A.B., Huntington K.W, Bernasconi S.M., Bergmann K.D. *A unified clumped isotope thermometer calibration (0.5–1100°C) using carbonate-based standardization* In press *GRL*
12. Bernasconi S.M., Daëron M., Bergmann K.D., Bonifacie M. , Meckler A.N., Affek H.P., Anderson N., Bajnai D., Barkan E., Beverly E., Blamart D., Burgener L., Calmels D.,

- Chaduteau C., Clog M., Davidheiser-Kroll B., Davies A., Dux F., Eiler J., Elliott B., Fetrow A. C., Fiebig J., Goldberg S., Hermoso M., Huntington K.W., Hyland E., Ingalls M., Jaggi M., John C.M., Jost A. B., Katz S., Kelson J., Kluge T., Kocken I.J., Laskar A., Leutert T.J., Liang D., Lucarelli J., Mackey T. J., Mangenot X., Meinicke N., Modestou S.E., Müller I.A., Murray S., Neary A., Packard N., Passey B.H., Pelletier E., Petersen S., Piasecki A., Schauer A., Snell K.E., Swart P.K., Tripathi A., Upadhyay D., Vennemann T., Winkelstern I., Yarian D., Yoshida N., Zhang N., Ziegler M. *InterCarb: A community effort to improve inter-laboratory standardization of the carbonate clumped isotope thermometer using carbonate standards* *In press G3*
13. Agrinier P., Bonifacie M., Bardoux G., Lucazeaux F., Giunta T., Ader M. Chlorine isotope data of chlorides challenge the pore fluid paradigm. *In press GCA*
 14. Wudarska, A.; Slaby, E.; Wiedenbeck, M.; Barnes, J.D.; Bonifacie, M.; Sturchio, N.C.; Coufignal, F.; Glodny, J.; John, T.; Kusebauch, C.; et al. *Inter-Laboratory Characterization of Apatite Reference Materials for Chlorine Isotope Analysis. Geostandard and Geoanalytical Research. doi: 10.1111/ggr.12366*
 15. Brigaud B., Bonifacie M., Pagel M., Blaise T., Calmels D., Haurine F., Landrein P. Past hot fluid flows in limestones detected by $\Delta 47/(U-Pb)$ and not recorded by other geothermometers *Geology*, May 2020, Vol.48,851-856. doi: 10.1130/G47358.1
 16. Hermoso M., McClelland H.-L. O., Hirst J. S., Minoletti F., Bonifacie M., Rickaby R.E.M., *Towards the use of the coccolith vital effects in palaeoceanography: A field investigation during the middle Miocene in the SW Pacific Ocean (2020) Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers DOI 10.1016/j.dsr.2020.103262*
 17. Thaler C., Katz A., Bonifacie M., Ménez B., Ader M. Oxygen isotope composition of waters recorded in carbonates in strong clumped and oxygen isotopic disequilibrium (2020). *Biogeosciences*, 17, 1–14, 2020. DOI 10.5194/bg-17-1731-2020
 18. Falcin A., Métaixian J.P, Mars J., Stutzmann E., Komorowski J.-C., Moretti R., Malfante M., Beauducel F., Saurel J.M., Dessert C., Burtin A., Ucciani G., de Chaballier J.-B., Lemarchand A. A machine learning approach for automatic classification of volcanic seismicity at La Soufrière volcano, Guadeloupe. (2020) *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 107151.
 19. Massaro S., Dioguardi F., Sandri L., Tamburello G., Selva J., Moune S., Jessop D., Moretti R., Komorowski J.C.K., Costa, A. (2021). Testing gas dispersion modelling: A case study at La Soufrière volcano (Guadeloupe, Lesser Antilles). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 107312.
 20. Le Losq C, Moretti R, Oppenheimer C., F. Beaudalet and Neuville D (2020) *In situ XANES study of the influence of varying temperature and oxygen fugacity on iron oxidation state and coordination in a phonolitic melt. Contrib Min Petrol* 411, 53-61.
 21. Cicconi MR, Moretti R and Neuville DR (2020) *Earth' Electrodes. Elements: An International Magazine of Mineralogy, Geochemistry, and Petrology* 16.3, 157-160
 22. Cicconi MR, Le Losq C, Moretti R and Neuville DR (2020) *Magma are, the Largest Repositories and Carriers of Earth's Redox Processes Elements: An International Magazine of Mineralogy, Geochemistry, and Petrology* 16.3, 173-178
 23. Moretti R., Stefansson A: (2020) *Volcanic and Geothermal Redox Engines. Elements: An International Magazine of Mineralogy, Geochemistry, and Petrology*, 16.3, 179-184.

24. *Schiavone R., De Natale G., Borgia A., Troise C., Moretti R., Somma R. (2020) Seismogenic potential of withdrawal-reinjection cycles: numerical modelling and implication on induced seismicity. Geothermics 85, 101770*

Publications de rang B / ouvrages

1. *Donnadiou, F., Jessop, D.E., Bani, O., Moune, S., Surveillance des volcans par télédection au sol, in press, Ed. J.F. Lénat, Aléas et surveillance de l'activité volcanique, ISTE-Geosciences.*
2. *Moune, S., Roulleau E. Surveillance in-situ des fluides volcaniques, in press, Ed. J.F. Lénat, Aléas et surveillance de l'activité volcanique, ISTE-Geosciences.*
3. *Paris, R., Bani, P., Chevrel, O., Donnadiou, F., Eychenne, J., Gauthier, P.J., Gouhier, M., Harris, A., Jessop, D., Kelfoun, K., Moune, S., Olivier, R., Thouret, J.C., Les aléas volcaniques, in press, Ed. J.F. Lénat, Aléas et surveillance de l'activité volcanique, ISTE-Geosciences.*
4. *Moretti R., De Natale G., Troise C. (2020) Hydrothermal versus magmatic : geochemical views and clues into the unrest dilemma at Campi Flegrei. In; Vesuvius, Campi Flegrei and Campanian Volcanism (De Vivo B., Belkin H. and Rolandi G. eds.), 371-406, doi.org/10.1016/B978-0-12-816454-9.00014-6*
5. *de Bremond d'Ars J., Carlus B., Deroussi S., Ianigro J.-C., Jessop D., Jourde K., Kergosien B., Le Gonidec Y., Lesparre N., Marteau J., MORETTI R., Nicollin F. and Rosas-Carbajal M. (in press) Observation of the Dynamics of Hydrothermal Activity in La Soufrière of Guadeloupe Volcano With Joint Muography, Gravimetry, Electrical Resistivity Tomography, Seismic and Temperature Monitoring. In Muography : Exploring Earth's Subsurface with Elementary Particles" (Oláh L., Tanaka H.K.M., Varga D.) Geophysical Monograph Series, American Geophysical Union Wiley. DOI: 10.1002/9781119722748.ch5*

10 présentations dans des conférences internationales,

dont 6 sur La Soufrière de Guadeloupe et l'Arc des Petites Antilles

1. *Agrinier P. Bonifacie M., Bardoux G., Lucazeau F., Giunta T., Ader M. Original chlorine isotope data of chlorides challenge the pore fluid paradigm, AGU Fall Meeting*
2. *Anderson N., Kelson J., Kele S., Daëron M., Bonifacie M., Mackey T., John C., Huntington K., Bernasconi S., Bergmann K. Reanalyzing carbonate clumped isotope calibration materials using robust carbonate standardization AGU Fall Meeting*
3. *Balcone-Boissard H., D'Augustin Thiébaud, Boudon G., Bekki S., Bonifacie M., Boudouma O., Bouvier Anne-Sophie, Carazzo G., Deloule E., Fialin M., Rividi N., (2020). Impact of volcanic halogens on the ozone layer and climate, a look to the past to highlight the present . EGU Conference 2020 Vienna*
4. *Massaro, S., Sandri, L., Selva, J., Dioguardi, F., Bonadonna, C., Rossi, E., Tamburello, G., Moretti, R., Komorowski, J.-C., Moune, S., Jessop, D., and Costa, A. (2020) Multi-hazard quantifications of the volcanic phenomena at La Soufrière volcano (Guadeloupe, Lesser*

- Antilles). EGU General Assembly 2020, Online, 4–8 May 2020, EGU2020-18496, <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu2020-18496> – ORAL (videoconf)*
5. *Falcin, A., Metaxian, J.-P., Mars, J., Stutzmann, E., Moretti, R., and Komorowski, J.-C. (2020) Automatic classification of seismo-volcanic signals at La Soufrière of Guadeloupe – EGU General Assembly 2020, Online, 4–8 May 2020, EGU2020-10234, <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu2020-10234>, 2020 ORAL (videoconf)*
 6. *Moretti R, Le Losq C, Neuville D -2020) The Mutual Interactions of Redox Species in Magmas: The Role of Differentiation and Volatile Degassing Goldschmidt Abstracts, 2020 1846*
 7. *Metcalfe A, Moune S, Kilgour G, Komorowski J-C, Jessop D, Legendre Y & Moretti R (2020) Linking the Timescales of Magmatic Processes and Unrest at La Soufrière de Guadeloupe. Goldschmidt Abstracts, 2020 1788 – ORAL (videoconf)*
 8. *Massaro S., Sandri L., Selva J., Dioguardi F., Tamburello G., Moretti R., Komorowski J.-C., Moune S., Jessop D.E (2020). Probabilistic hazard quantifications posed by gas dispersal phenomena at La Soufrière volcano (Guadeloupe, West French Indies) WP12–JR4.2: Exploitation of tools for hazard assessment and risk management (WP12.1 task). EUROVOLC Annual Meeting - Catania, 27-31 January 2020 (POSTER)*
 9. *Massaro S., Sandri L., Selva J., Bonadonna C., Rossi E. Komorowski J.-C., Moretti R., Moune S., Jessop D.E (2020). Quantifying the hazard caused by volcanic ballistic impacts at La Soufrière volcano (Guadeloupe, West French Indies) WP12–JR4.2: Exploitation of tools for hazard assessment and risk management (WP12.1 task). EUROVOLC Annual Meeting - Catania, 27-31 January 2020 (POSTER)*
 10. *Moretti R., Komorowski J.-C., Moune S., Robert V., Jessop D., de Chabalière J.B., Beauducel F., Bonifacie M., Deroussi S., Didier S., Kitou T. (2020) Soliciting hydrothermal systems: the case of La Soufrière of Guadeloupe (FWI) and the 2018 episode of accelerated unrest. EUROVOLC Annual Meeting - Catania, 27-31 January 2020 (POSTER)*

Participation à Congrès Internationaux :

EUROVOLC Annual Meeting – Catania (I), du 27 au 31 Janvier 2020

5. Collaborations, information et prévention

5.1 Collaborations locales

- **Service Interministériel de Défense et de Protection Civile** (Préfecture) : échanges d'information et réunions sur les risques sismiques et volcaniques, plan ORSEC Tsunamis, potentiel hélicoptère.
- **Bureau de Recherches Géologique et Minière** (BRGM) : CDSA, CASAVA, co-organisation de séminaires au Houëlmont.
- **Université des Antilles** (UA) : CDSA, CPER, SATCAR, organisation de séminaires scientifiques.
- **Parc National de Guadeloupe** : participation régulière de personnel pour nous aider dans les missions de terrain et échanges scientifiques ; C. Dessert (OVSG-ObsErA-IPGP) est membre élu du conseil scientifique.
- **Rectorat de Guadeloupe** : contribution à l'élaboration de documents pédagogiques, formations de professeurs, Plan Particulier de Mise en Sûreté, Sismos à l'École.
- **Direction de l'Environnement, de l'aménagement et du Logement** (DEAL, regroupant les ex – DIREN, DDE et DRIRE) : échanges de données hydrologiques, missions communes de prélèvements, échanges d'informations sur les risques naturels, actions de prévention, CDRNM (Commission Départementale des Risques Naturels Majeurs).
- **Institut National de la Recherche Agronomique** (INRA) : échanges d'informations et de savoir-faire sur les équipements de bassins versants.
- **Météo France Guadeloupe** : Échange de données, relevé et entretien de stations météorologiques.
- **Archipel des Sciences** (ADS)
- **Route de Guadeloupe** : Collaboration pour la réglementation de la route d'accès à la Soufrière.

5.2 Collaborations nationales

- **Cellule Centrale Interministérielle d'Appui au Plan Séisme Antilles (CCIASA)** (Ministère de l'Écologie, du Développement Durable, des Transports et du Logement) : collaborations sur le plan séisme.
- **Bureau Central Sismologique Français (BCSF, EOST)** : Collaborations autour des enquêtes macrosismiques en Guadeloupe.

5.3 Collaborations régionales et internationales

- **Montserrat Volcano Observatory** (MVO) : Des missions à Montserrat lors de la réunion du Scientific Advising Commity permettent de suivre l'évolution de l'éruption de Soufriere Hills.
- **Seismic Research Center** (University of the West Indies, Trinidad) : Déploiement en commun de stations sismologiques large-bande sur l'arc des Antilles à travers le projet InterReg TSUAREG ; échanges de données sismologiques régionales. Exploitation scientifique commune des données.
- **United States Geological Survey** (USGS) : Echange de données, d'échantillons et de savoir-faire sur les équipements de bassins versants dans le cadre d'une étude comparative de l'érosion en Guadeloupe et à Puerto Rico.

- **SATCAR (Système d'alerte aux tsunamis dans la mer des Caraïbes) :** L'observatoire est fournisseur de données sismologiques et marégraphiques.

Dans le cadre du SATCAR, l'OVSG collabore avec les pays et territoires de la mer des Caraïbes, l'état major inter-ministériel de la zone de défense et de sécurité Antilles, la Commission Océanographique Inter-gouvernementale de l'UNESCO,

Sébastien Deroussi est vice-président du groupe de travail numéro 1 en charge de la marégraphie.

5.4 Information grand public et prévention

L'Observatoire a une visibilité et une crédibilité très forte tant au niveau des autorités locales que de la population et des médias. Les différents événements telluriques de ces dernières années qu'ils soit locaux (séisme des Saintes en 2004, séisme de Martinique en 2007, séisme de Haiti en 2010, dépôt de cendre de Montserrat en Guadeloupe en février 2010) ou internationaux (séismes et tsunamis de Sumatra en 2004 et du Japon en 2011) ont ancré d'avantage la place de l'observatoire dans la société guadeloupéenne face à ces risques naturels.

Afin de répondre aux sollicitations permanentes en matière d'information, l'observatoire a ouvert dès 2001 ses portes à des visites hebdomadaires. Cet effort a été poursuivi en 2015 ainsi que la plupart des autres actions menées les années précédentes en matière de diffusion de l'information au public. Depuis la fin 2012, une nouvelle politique de visite privilégie les visites de groupes (scolaires, associations) non plus sur la base de visites hebdomadaires régulières, mais sur le principe de visites programmées. L'observatoire ouvre ses portes pendant les journées du patrimoine et la fête de la science.

Diffusion du bulletin mensuel et des communiqués

- Diffusion du bulletin mensuel de l'activité volcanique de la Soufrière de Guadeloupe et de la sismicité régionale au grand public, aux médias, et aux décideurs par courriel et télécopie (plus de 300 destinataires). Ces bulletins sont mis à disposition sur le site Internet de l'IPGP (<http://www.ipgp.fr/ovsg>).
- En plus des bulletins mensuels, **des communiqués** ont été envoyés en **2020** pour des séismes ressentis (exemples en annexes). Les communiqués sont également mis à disposition sur le site Internet de l'IPGP.

Médias et réseaux sociaux

- Depuis 2018 vous pouvez retrouver l'ensemble Retrouvez l'ensemble des informations sur nos activités à la page Facebook (<https://www.facebook.com/ObsVolcanoSismoGuadeloupe/>) et sur le compte Twitter (<https://twitter.com/ObsGuadeloupe?lang=fr>).

6. Conclusions et perspectives

Avec le début 2020 nous avons assisté à une partielle accalmie après le processus cyclique en 2018 d'injection de gaz magmatiques profonds à la base du système hydrothermal à une profondeur entre 2 et 3 km sous le sommet. Ceci avait engendré un processus récurrent de surchauffe et de surpression du système hydrothermal qui se traduit par : 1) des perturbations de la circulation des fluides hydrothermaux ; 2) l'évolution de l'activité des fumerolles au sommet dont une témoigne de projection de boue brûlante et acide sur quelques mètres ; 3) une augmentation de la sismicité volcanique en essaim ; 4) quelques séismes volcaniques ressentis (quatre entre février et avril 2018) dont un séisme de magnitude M4.1 le 27 avril 2018, le plus fort depuis 1976 ; 5) des déformations de faible amplitude et limitées au dôme de La Soufrière de l'ordre de 3-7 mm/an et la poursuite de l'ouverture des fractures sommitales ; 6) la fluctuation des débits du gaz fumerollien issu d'un réservoir hydrothermal pressurisé ; 7) une progression des anomalies thermiques dans le sol au sommet de La Soufrière.

En complément de l'activité sismique enregistrée en 2020 par les réseaux de l'Observatoire Volcanologique et Sismologique de Guadeloupe (OVSG-IPGP), l'activité volcanique nous rappelle donc que la Guadeloupe fait partie d'une zone géodynamique active. Cette spécificité nécessite une observation intégrée complète et continue dans le but d'alimenter des bases de données pluridisciplinaires permettant à la recherche fondamentale et appliquée d'améliorer la compréhension de ces phénomènes et leur prévision à long terme.

Ceci est donc bien la mission première de l'OVSG-IPGP. Cette mission s'accompagne d'un effort toujours présent de faire connaître le plus largement et précisément possible les raisons de cette activité volcanique et sismique et les nécessités impératives de prendre en compte de manière rationnelle, lucide, et objective, les risques aux hommes et aux biens qui lui sont associés, dans une perspective de développement harmonieux de la société avec son environnement.

Pour 2021, on peut d'ores et déjà mentionner les perspectives suivantes :

- développer la modernisation de l'instrumentation des réseaux de surveillance volcanique destinés à détecter les évolutions du système magmatique en profondeur
- poursuivre le suivi de l'activité fumerollienne et hydrothermale de la Soufrière de Guadeloupe
- réaliser la mise en place de nouveaux outils informatiques permettant d'afficher en temps réel l'ensemble des données acquises par les réseaux de l'OVSG.
- poursuivre la mise en place d'outils d'analyse de la sismicité et des déformations en temps réel
- renforcer la collaboration scientifique régionale, avec L'UA, le BRGM et le SRC/UWI (Trinidad) à travers l'exploitation de données acquises et l'encadrement d'étudiants.
- développer des outils de diffusion de la culture scientifique en géosciences en Guadeloupe avec l'ouverture d'un site WEB public pour la diffusion de l'information produite par l'OVSG. .
- ... et bien sûr récupérer dans le marge du possible ce que la pandémie nous a enlevé, en souhaitant un progressif retour à la normalité.

