

Rapport annuel 2023

Observatoire volcanologique et sismologique de Guadeloupe - IPGP





> Couverture

Photo de la bouche sud (CSS) de la fissure Cratère Sud prise le 8 décembre 2022. Cette photo montre la présence de soufre liquide (noir) à l'intérieur de l'évent, témoignant d'une température durablement au-dessus du point de fusion du soufre natif (115 – 120°C). Des températures très élevées, dépassant pour la première fois 200°C depuis le début des observations, seront confirmées par des mesures directes et par caméra thermique tout au long de l'année 2023 (crédit : I. Vlastélic).

> Citation de ce rapport

Rapport annuel d'activité de l'Observatoire Volcanologique et Sismologique de Guadeloupe – synthèse 2023, Institut de Physique du Globe de Paris, décembre 2023

> 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 la délégation régionale académique à la recherche et à l'innovation (DRARI) 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. Merci à l'Université des Antilles pour accueillir l'OVSG-IPGP au sein de ses conseils d'administration et conseils de pôle.

L'Observatoire remercie ses partenaires régionaux des Petites Antilles (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) pour le partage des données sismologiques.

Nous remercions également tous les collègues, missionnaires et stagiaires qui au détour de leurs études spécifiques nous ont aidé de près ou de loin dans nos missions de surveillance.

Merci à la directrice du Parc National de Guadeloupe et aux agents du secteur Soufrière pour leur collaboration et aide régulière sur le terrain.



Sommaire

Résumé	5
1. Présentation de l'observatoire	6
> Historique et missions	6
> Fonctionnement et organigramme.....	7
> Personnel	9
2. Activité de La Soufrière de Guadeloupe	12
> Contexte	12
> Sismicité volcanique	13
> Déformation	17
> Activité fumerolienne et chimie des gaz	22
> Lac acide du Gouffre Tarissan	26
> Sources thermales.....	29
> Météorologie au sommet	31
3. Activité tellurique régionale	32
> Contexte	32
> Sismicité régionale	32
> Sismicité dans la zone des Saintes	35
4. Réseaux de mesure.....	37
> Réseau sismologique	37
> Réseau géodésie et extensométrie	43
> Réseau géochimique.....	47
> Réseau thermique et flux de CO ₂	50
> Réseau météorologique	51
> Projet de forages instrumentés.....	52
5. Acquisition, traitement, visualisation, archivage et partage des données.....	53
> Acquisition, traitements et archivages des données sismologiques.....	53
> Acquisition, traitement et alerte GNSS (Global Navigation Satellite System)	54
> Les laboratoires de chimie des eaux et des gaz	55
> Systèmes de supervision automatisée	55
> L'infrastructure informatique	56
> Système WebObs pour la recherche et la surveillance scientifique.....	58



6. Recherche et collaborations	60
> Projets de recherche pilotés par les chercheurs de l'OVSG et l'ObsERA	60
> Recherche en collaboration	65
> Publications	70
7. Autres activités.....	72
> Relation avec la préfecture et le SIDPC	72
> Relation avec le Conseil Départemental	72
> Relation avec l'Université des Antilles	72
> Autres relations	73
> Formations, communications grand public	73
> Interventions dans les médias	74
> Réseaux sociaux.....	74
> Visiteurs et missionnaires	75
> Vie de l'observatoire	76



Résumé

Après deux années marquées par d'importants mouvements de personnels, l'année 2023 a vu **l'équipe de l'OVSG se stabiliser** et se consolider à **11 agents dont deux contractuels**. Une gestionnaire CNRS statutaire (Imen Defferrard) a rejoint l'équipe via une procédure FSEP de mobilité inter-institut, et une ingénieure d'étude en analyse chimique (Elodie Chilin-Eusebe) a été recrutée sur un support permanent CNRS. Les contrats de Julien Novar, ingénieur d'étude en instrumentation, et de Jolaine Ajax, technicienne, puis assistante ingénieur en analyse chimique, ont été prolongés. Fin 2023, les moyens humains impliqués dans le fonctionnement de l'OVSG représentaient **10,0 Equivalents Temps Plein (ETP)**.

En 2023, l'OVSG a poursuivi la fiabilisation, l'extension et la modernisation des réseaux de surveillance. Dans le cadre d'une convention avec le ministère de la transition écologique, nous avons débuté **une mise à jour en profondeur des serveurs informatiques**, pour améliorer leur fiabilité et munir l'observatoire d'outils modernes de supervision, sauvegarde, et assistance. La **dernière version du logiciel Webobs** de traitement et visualisation des données a été installée et mise en service. Sur le terrain, nous avons avancé le projet d'installation de **stations multi-paramètres en forage**, avec la finalisation des superstructures sur les flancs du volcan de la Soufrière, le câblage complet des coffrets d'intégration, et le test d'une station complète dans les locaux de l'observatoire. Au niveau du laboratoire de chimie, après plus d'un an d'interruption, **l'analyse des gaz non condensables** par spectrométrie de masse est à nouveau réalisée en routine, permettant de suivre dans des délais courts la composition des gaz de la Soufrière. Mais l'année 2023 aura aussi été marquée par la **tempête PHILIPPE et l'ouragan TAMMY** (Octobre 2023) qui ont endommagé la station sismique de Désirade, inondé la cave de la station de Terre-De-Bas aux Saintes, et impacté une nouvelle fois la sortie de la source thermale Tarade. Indépendamment de ces tempêtes, nous déplorons la perte de la station BERA d'Anse Bertrand lors des travaux de rénovation de l'hippodrome. De façon générale nous constatons le **vieillessement de l'ensemble des stations VSAT** qui ont été construites entre 2008 et 2012 en réponse à la mise en place du système d'alerte aux tsunamis dans la Caraïbe.

La Guadeloupe et sa région ont connu en 2023 **une activité volcanique et tellurique soutenue** : l'OVSG a enregistré près de **5000 séismes volcaniques, dont 8 essaims sismiques, et 1701 séismes tectoniques, dont 877 (52%) ont pu être localisés**. La détection et la caractérisation des petits séismes ont été améliorés grâce à (1) l'installation de la station sismique de Grand-llet (secteur des Saintes) en décembre 2022, et (2) l'utilisation du code PHASEWORM pour la détection et la localisation automatique des séismes par « machine learning ». Cette activité tellurique a été l'objet de **8 communiqués** relatifs à la sismicité volcanique et **13 communiqués relatifs** à des séismes tectoniques ressentis. Les séismes tectoniques les plus importants, fortement ressentis sur le territoire, se sont produits le 20 janvier 2023 à 27 km à l'ouest-nord-ouest de Bouillante à 184 km de profondeur (**M= 5.9**), et le 2 décembre 2023 à 50 km au nord de La Désirade à 24 km de profondeur (**M=6.0**). Le second événement a coïncidé avec un **essaim sismique dans le secteur des Saintes** (30 novembre – 2 décembre).

L'activité du volcan de La Soufrière a été marquée par une **augmentation très importante de la température des fumerolles, dépassant pour la première fois 200°C au Cratère Sud** depuis le début du suivi. Cette augmentation implique un déséquilibre entre le flux de chaleur profond et la quantité d'eau disponible dans le système hydrothermal. Parallèlement, l'activité fumerolienne a continué à s'étendre au sommet et sur les flancs du volcan. Le réseau GNSS a enregistré en 2023 la poursuite de la **déformation radiale centrifuge du sommet du volcan**, en réponse à la pressurisation globale du système hydrothermal. Ce gonflement semble toutefois ralentir, en accord avec les données d'extensométrie qui révèlent un ralentissement de l'ouverture, voire une tendance à la contraction des grandes failles sommitales. Cette **tendance à la dépressurisation** est accompagnée d'une **baisse de 28 % de l'énergie libérée par l'activité sismique** relativement à 2022. Cette baisse est de 54% si l'on se réfère à l'année 2021. Après une alimentation massive en fluides hydrothermaux profonds début 2022, le niveau du lac Tarissan est resté haut en 2023. Les sources thermales situées en altitude sur le flanc sud de la Soufrière ont poursuivi leur réchauffement débuté il y a plus de 25 ans, témoignant du réchauffement lent mais continu du système hydrothermal de la Soufrière. Malgré ces tendances, les signatures des gaz inertes et la sismicité profonde très faible indiquent une stabilité du système magmatique en profondeur. Dans ces conditions, **le niveau d'alerte volcanique a été maintenu au niveau de vigilance jaune**. Cependant, vu l'augmentation de l'activité fumerolienne au sommet du volcan, la préfecture de Guadeloupe a décidé de mettre à jour l'arrêté réglementant l'accès aux zones actives.



1. Présentation de l'observatoire

> Historique et missions

L'Observatoire Volcanologique et Sismologique de Guadeloupe (OVSG) est l'un des quatre observatoires volcanologiques dédiés à la surveillance des volcans actifs français (Soufrière de Guadeloupe, Montagne Pelée en Martinique, Piton de la Fournaise à la Réunion, volcanisme sous-marin au large de Mayotte). Cette surveillance s'effectue sous la responsabilité 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.

Installé en 1950 sur le site de Parnasse à Saint-Claude, puis dans la Grande Poudrière du Fort St-Charles à Basse-Terre suite à la crise de 1976-1977, l'OVSG rejoint en 1993 son emplacement actuel au sommet du Houëlmont. Depuis 2012, l'OVSG abrite l'OBServatoire de l'Eau et de l'éROsion aux Antilles (ObsERA) avec lequel il partage plusieurs moyens humains (gestionnaire, ingénieurs, techniciens), logistiques (voitures), analytiques (laboratoire de chimie) et d'acquisition de données (pluviométrie). Ses effectifs permanents (OVSG + ObsERA hors missionnaires) sont de **12 agents en 2023**, dont deux enseignante-chercheuses, un chercheur, une gestionnaire et huit ingénieurs et techniciens, dépendant du Corps National des Astronomes et Physiciens (CNAP), du Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS) et de l'IPGP. 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 la Transition Ecologique et de la Cohésion des Territoires (MTECT). 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-CNRS et l'IPGP, dont le dernier avenant date de 1996. 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 (SIDPC dépendant de la 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.



> Fonctionnement et organigramme

Le fonctionnement de l'OVSG repose sur une équipe principale présente en permanence sur place. Cette équipe est épaulée par des membres du Service National d'Observation en Volcanologie (SNOV) qui apportent un soutien régulier à distance, ou ponctuel au cours de missions (personnel support). Ce personnel support comprend des chercheurs et ingénieurs principalement basés à l'IPGP Paris, mais aussi dans les autres observatoires volcanologiques permanents de Martinique (OVSM) et de la Réunion (OVPF), et à l'Observatoire de Physique du Globe de Clermont-Ferrand. Il apporte un appui quotidien dans la logistique, la gestion, l'acquisition, la modélisation et l'interprétation des données. Il est aussi une ressource indispensable permettant de faire face au surcroît de sollicitation de l'équipe principale de l'OVSG lors des crises volcaniques ou sismiques (localisation des séismes, expertise) et lors d'opérations importantes sur les réseaux instrumentaux de l'OVSG (réseau VSAT, forages instrumentées, mise à jour WebObs, nouveau code pointeur de séismes). Ces ressources externes, et la mutualisation des moyens, constituent une force de l'OVSG et, plus généralement, du SNOV. Réciproquement l'équipe principale de l'OVSG apporte son soutien à l'OVSM (e.g. analyses chimiques de fluides) et peut être en partie mobilisée en fonction de l'activité en Martinique notamment. La figure 1 résume les principales ressources humaines externes, intervenant au quotidien, et les autres acteurs intervenant ponctuellement et/ou mobilisables en cas de besoin (expertise, analyse) ou de crise.

Ressources humaines internes, externes et mobilisables

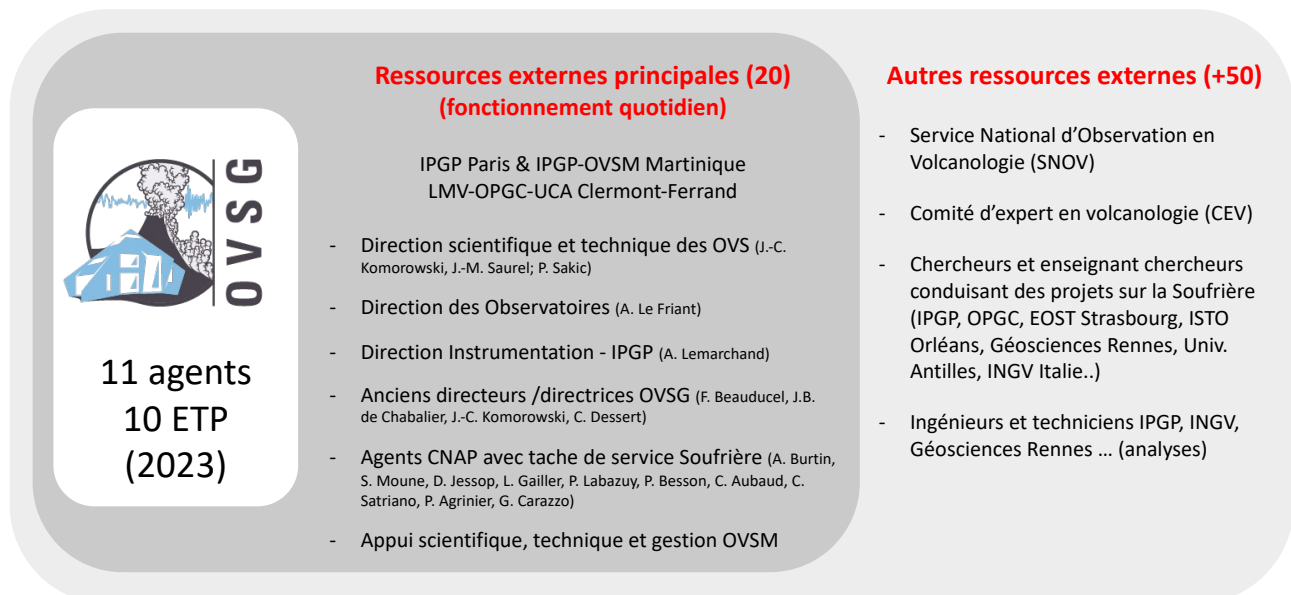


Figure 1. Ressources humaines internes (OVSG), externes et mobilisables en cas de besoin (expertise, analyse) ou de crise.

Après deux années marquées par d'importants mouvements de personnels, l'année 2023 a vu l'équipe de l'OVSG se stabiliser et se consolider à **11 agents** dont deux contractuels. Une gestionnaire CNRS statutaire (Imen Defferrard) a rejoint l'équipe via une procédure de mobilité inter-institut, et une ingénieure d'étude en analyse chimique (Elodie Chillin-Eusebe) a été recrutée sur un support permanent CNRS. Les contrats de Julien Novar, ingénieur d'étude en instrumentation, et de Jolaine Ajax, technicienne en analyse chimique, ont été prolongés (Fig. 2). Si l'on tient compte des implications de Thierry Kitou (20%), Elodie Chillin (20%), Jolaine Ajax (40%) et Imen Defferrard (20%) dans les tâches de l'ObsERA, les moyens humains strictement impliqués dans le fonctionnement de l'OVSG représentent **10,0 ETP** (Equivalents Temps Plein). L'OVSG bénéficie aussi des services d'un gardien (Christian Moanda) rémunéré par le Conseil Départemental.



Organigramme 2023 de l'Observatoire Volcanologique et Sismologique de Guadeloupe

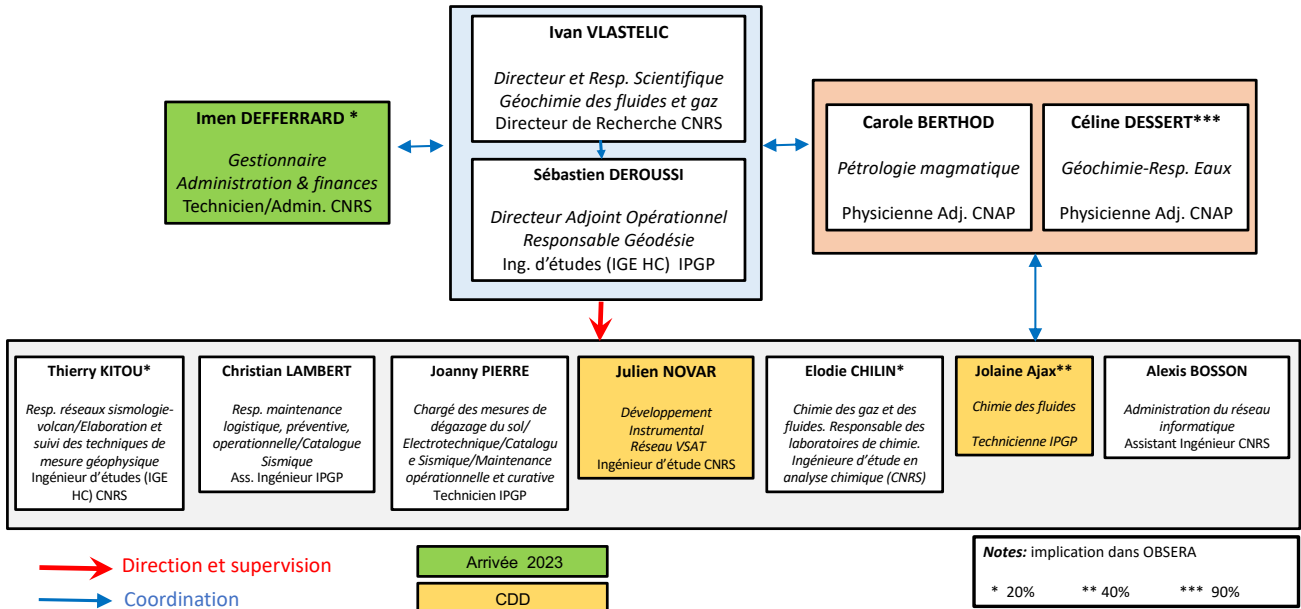


Figure 2. Organigramme et photo de l'équipe 2023 de l'OVSG. De gauche à droite : Julien Novar, Sébastien Deroussi, Joanny Pierre, Elodie Chilin-Eusebe, Carole Berthod, Jolaine Ajax, Thierry Kitou, Christian Lambert, Imen Defferrard, Ivan Vlastélic (absent : Alexis Bosson)



> Personnels OVSG sur site

Prénom NOM	Fonction
Equipe scientifique	
Carole BERTHOD	PHAD – Pétrologie magmatique
Céline DESSERT***	PHAD – Directrice-adjointe de l'OBSERA – Géochimie environnementale
Ivan VLASTELIC	DR CNRS – Directeur et responsable scientifique – Géochimie
Equipe technique	
Jolaine AJAX**	TECH IPGP – Projet IMMERGE — Physico-chimie des fluides
Alexis BOSSON	AI CNRS – Responsable informatique et administrateur système
Elodie CHILIN-EUSEBE*	IE CNRS – Physico-chimie des fluides (depuis 1/12/2023)
Imen DEFFERRARD*	TECH CNRS Gestionnaire (arrivée 1/08/2023)
Sébastien DEROUSSI	IE IPGP - Directeur adjoint opérationnel - Responsable du réseau géodésique
Thierry-Gaëtan KITOU*	IE CNRS – Responsable du réseau sismologique de la Soufrière
Christian LAMBERT	AI IPGP – Logistique et maintenance des réseaux
Julien NOVAR	IE CNRS (CDD 3 ans avant concours) – Développement/maintenance des instruments
Joanny PIERRE	TECH IPGP – Catalogue sismologique / flux de chaleur et dégazage du sol
Christian MOANDA	Gardien (Conseil Départemental)
% Implication dans ObsERA : * 20% ** 40% *** 90%	

> Ressources humaines SNOV – IPGP extérieures

Prénom NOM	Fonction
Pierre AGRINIER	PHY IPGP - géochimie des isotopes stable C, O, H, fluides de la Soufrière
François BEAUDUCCEL	PHY IPGP - géodésie
Pascal BERNARD	PHY IPGP – sismologie - capteur fibre optique
Pascal BESSON	PHAD – Géochimie, analyses fluo X
Sébastien BONAIME	IR, CNRS, responsable du pôle drone



Magali BONIFACIE	CR CNRS - géochimie des isotopes du chlore des fluides de la Soufrière
Pierre BURCKEL	IE – Géochimie, analyses ICPMS
Arnaud BURTIN	PHAD – sismologie volcanique
Guillaume CARAZZO	PHAD - Modélisation de la dispersion des cendres
Jordanne CORBEAU	PHAD IPGP-OVSM, sismotectonique et sismologie régionale
Jean-Bernard de CHABALIER	PHAD (géodésie)
Franck DONNADIEU	PHY OPGC - monitoring thermique et par polarisation spontanée du sol
Lydie GAILLER	PHAD OPGC - imagerie géophysique (ERT, magnétisme)
Raphaël GRANDIN	MC IPGP - imagerie satellitale (InSAR, visible, multispectral)
Samia HIDALGO	TECH IPGP - préparation des échantillons solides et liquides analysés à l'IPGP
David JESSOP	PHAD OPGC - flux de chaleur et dégazage du sol
Jean-Christophe KOMOROWSKI	PHY, responsable scientifique des OVS, géologie, modélisation des aléas
Philippe LABAZUY	PHAD OPGC, imagerie géophysique (ERT, magnétisme)
Anne LE FRIANT	DR CNRS - Directrice adjointe IPGP en charge des Observatoires
Arnaud LEMARCHAND	IR IPGP - Directeur adjoint IPGP en charge de l'instrumentation
Séverine MOUNE	PHAD OPGC – géochimie des gaz
Telly NDUWAYO	IPGP - Responsable du Pôle Gestion des Observatoires
Costanza PARDO	IR CNRS, Centre de données de l'IPGP, gestion des flux de données des OVS
Samantha PHEMIUS	IPGP-OVSM - Gestionnaire OVSM
Lise RETAILLEAU	PHAD IPGP-OVVF, mise en place code de détection, classification, et localisation automatique par machine learning PHASEWORM à l'OVSG
Marina ROSAS-CARBAJAL	CR CNRS, Imagerie géophysique ERT et muons sur la Soufrière (ANR Mygale)
Pierre SAKIC	IR IPGP, OVS
Claude SATRIANO	PHAD IPGP, Centre de données de l'IPGP, webservices Volobsis des OVS, et sismologie régionale
Jean-Marie SAUREL	IR IPGP, responsable technique des OVS

PHY : Physicien ; PHAD : Physicien-Adjoint ; DR : Directeur de recherches ; CR : Chargé de recherches ; MC : Maître de conférence ; IR : Ingénieur de recherche ; IE : Ingénieur d'étude ; AI : Assistant ingénieur ; TECH : Technicien ; AA : Adjoint administratif



> Doctorants (Thèses sur la Soufrière avec implication directe ou indirecte de l'OVSG)

Prénom NOM	Sujet - Direction
Raphaël BAJOU	Traitement et inversion des données de muographie sur la Soufrière de Guadeloupe (dir. M. Rosas-Carbajal, A. Tonazzo) Thèse soutenue le 6 Juin 2023
Amélie KLEIN	Soil CO2 flux, thermal flux and self-potential at la Soufrière de Guadeloupe: implications for changing patterns of fluid motion within the dome (dir. F. Donnadieu, D. Jessop)
Laëticia PANTOBE	Analyse et développements d'outils de traitement de la sismicité volcanique de la Soufrière (dir. J-C Komorowski, A. Burtin, C. Chanard)
Etienne LE GLAS	Isotopie du chlore des fluides de la Soufrière de Guadeloupe (dir. M. Bonifacie, P. Agrinier). Thèse soutenue le 4 Juillet 2023.



2. Activité de La Soufrière de Guadeloupe

> Contexte

Le complexe de la Grande Découverte-Soufrière est composé de trois 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 effondrement 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.

Depuis 1992 et la réactivation du Cratère Sud, l'activité fumerolienne 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 deux 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 (Fig. 3). Cette zone fumerolienne 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 (Fig. 3) marque une étape majeure de l'évolution du sommet. Depuis le début de l'année 2018 nous assistons à un processus cyclique d'injection de gaz magmatiques profonds à la base du système hydrothermal à une profondeur entre 2 et 3 km sous le sommet. Ceci engendre 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 qui a produit par le passé occasionnellement (au moins en février 2016, novembre 2021, mai 2022) des projections de boue brûlante et acide ou une poussière fine sur quelques mètres pour au moins 2 fumerolles (Cratère Sud Nord ; NapE1) ; 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 horizontales de faible amplitude et limitées au dôme de La Soufrière de l'ordre de 3 à 7 mm/an et la poursuite de l'ouverture des fractures sommitales à des taux atteignant 11 mm/an en 2022 ; 6) la fluctuation des débits du gaz fumerolien issus d'un réservoir hydrothermal pressurisé ; 7) une progression des anomalies thermiques dans le sol au sommet de La Soufrière. Si ces phénomènes incitent l'observatoire à la vigilance instrumentale, ils ne sont pour l'instant pas clairement associés à une anomalie des autres paramètres de surveillance qui pourrait indiquer une éventuelle remontée de magma. Cette dernière se manifesterait typiquement, mais pas systématiquement, par des séismes profonds et/ou ressentis plus nombreux et plus énergiques, des déformations de plus grande amplitude au-delà du dôme, et l'émission de gaz soufrés à très haute température (> 300°C). 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. Compte tenu de l'évolution décrite ci-dessus, le Préfet de la Région de Guadeloupe a émis le 14 janvier 2019 un arrêté (arrêté n° 2019/001 CAB SIDPC) 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 3. Vue aérienne du sommet de la Soufrière de Guadeloupe, depuis l'est (OVSG, 2016). Les principaux gouffres et fractures mentionnés dans ce rapport sont indiqués. **G56** : gouffre 1956 (apparition de l'activité fumerolienne en 2007 et débit en augmentation depuis 2015). **CSS, CSC et CSN** : Cratère Sud Sud, Cratère Sud Centre et Cratère Sud Nord (réactivation en 1992). **NapN et NapE** : Fumerolle Napoléon Nord (apparition de la fumerolle en juillet 2014) et fumerolle Napoléon Est (apparition de la fumerolle en 2016). **Tarissan** : gouffre Tarissan (réactivation de l'activité fumerolienne en 1998 et panache permanent à partir de 2000). **Dupuy** : gouffre Dupuy. **Hammouya** : trou au voisinage duquel un point chaud associé à une dégradation de la végétation a été observé en 2023.

> Sismicité volcanique

La sismicité volcanique traitée dans cette partie est issue des traitements par association de forme d'onde sismique (répéteur sismique) qui constitue la majorité en nombre du catalogue de sismicité volcanique à la Soufrière de Guadeloupe (~85%). La procédure de détection automatisée concerne actuellement 5 familles d'événement volcanique qui se localisent toutes dans la partie superficielle du dôme, c'est-à-dire à une profondeur de moins d'un kilomètre sous le sommet.

Bilan de l'activité des répéteurs sismiques

L'année 2023 comptabilise 4982 séismes Volcano-Tectoniques (VT) (Fig. 4). Par comparaison, l'année 2022 comptait 5317 VT ce qui représente une légère baisse d'environ 6 %. L'activité sismique a surtout été importante à la fin du mois d'avril mais elle s'est maintenue à un niveau de fond relativement important tout au long de l'année (Fig. 4). Il y a donc eu peu d'essaims sismiques déclarés mais cela ne caractérise pas une absence d'activité. Du point de vue énergétique, l'énergie sismique libérée par les répéteurs correspond à un total de 18 MJ. Cette énergie a été principalement associée aux essaims de janvier, avril et de début décembre (Fig. 4). Pour mieux comprendre ce chiffre, l'énergie de 18 MJ est équivalente à l'énergie libérée par un seul séisme de magnitude 1.6. En 2022, l'énergie sismique libérée était de 25 MJ, ce qui correspond à une **baisse de 28 %**. La baisse est de **54% par rapport à l'année 2021** pendant laquelle 39 MJ ont été libérés. Une dernière observation faite à la fin de l'année est la disparition de la classe d'événement VT-2 à la suite des séismes tectoniques du 2 décembre 2023 (UT) d'une magnitude de 5.2 et 6.0 au large de la Désirade. Les forts séismes peuvent produire de l'endommagement lors du passage des ondes sismiques et modifier temporairement l'activité sismique. L'apparition du VT-2 s'était faite à la suite du séisme de magnitude 4.1 d'avril 2018 à environ 3 km au nord-ouest du massif de la Soufrière. Il est possible que les séismes du 2 décembre 2023 aient perturbé les fractures du système hydrothermal superficiel. Cette perturbation peut s'estomper dans le temps avec un retour de la classe VT-2, sa disparition permanente ou encore la création d'une nouvelle classe avec des caractéristiques qui seront à établir.

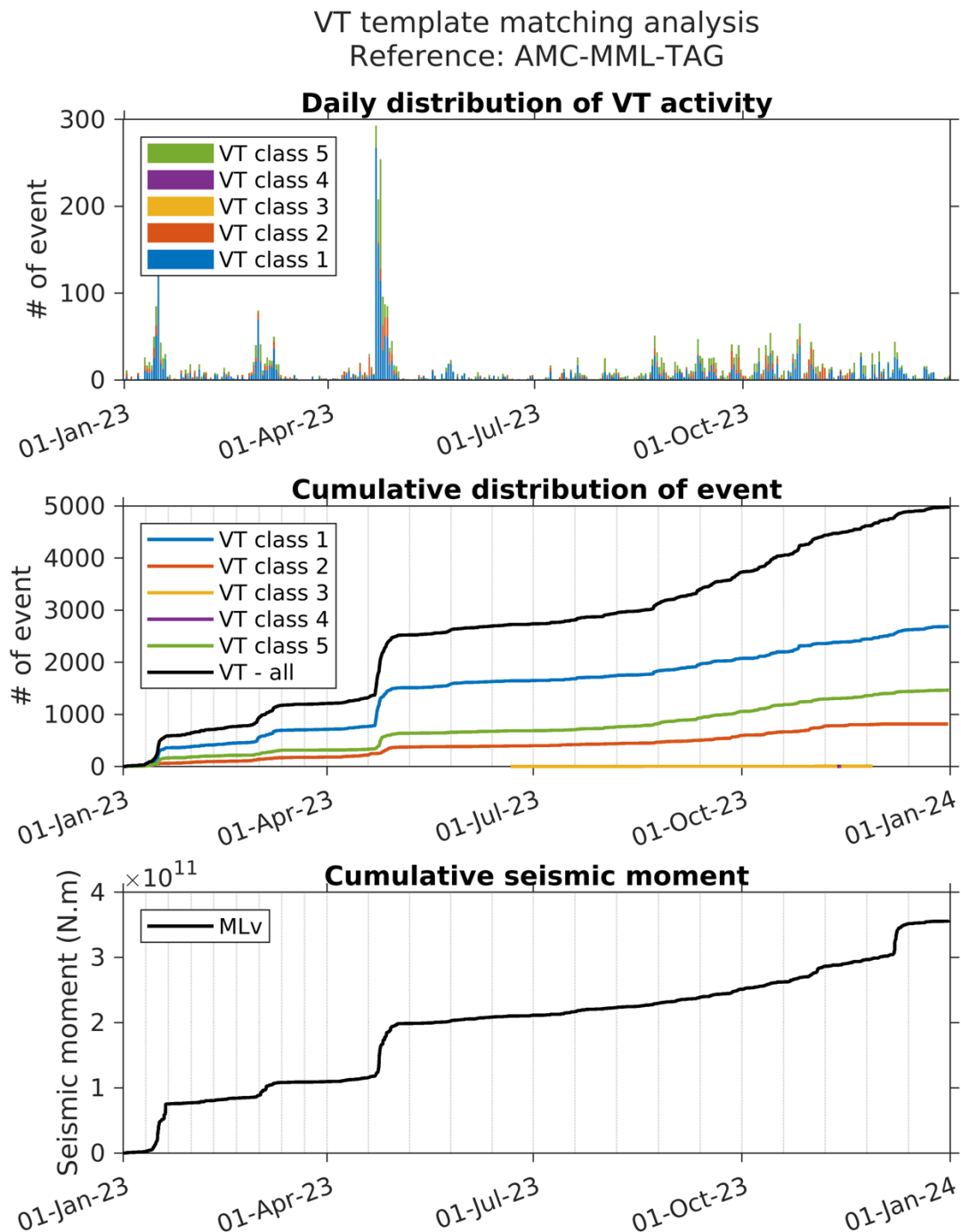


Figure 4. Bilan 2023 des répéteurs sismo-volcaniques à la Soufrière de Guadeloupe. (Haut) Distribution journalière du nombre de séismes Volcano-Tectoniques (VT) par classe de répéteur. (Milieu) Distribution cumulée du nombre de séismes VT par classe de répéteur et total (courbe noire). (Bas) Moment sismique cumulé au cours de l'année 2023 pour les VT détectés. Le moment sismique est proportionnel à l'énergie sismique libérée suivant la relation : Moment (N.m) $\sim 20000 \times$ Energie (J).



Localisation des répéteurs sismiques

L'ensemble des répéteurs VT-1, VT-2 et VT-5 sont localisés automatiquement et de façon relative, impliquant une plus grande précision sur la position des hypocentres les uns par rapport aux autres. Il est ainsi possible de voir que ces séismes se concentrent le long d'un conduit sub-vertical à une élévation de 500 à 900 m (équivalent à une profondeur de 600 à 1000 m sous le sommet) à l'aplomb du gouffre Tarissan (Fig. 5). On note que les VT-1 sont généralement plus profonds que les VT-2, et que les VT-5 se localisent entre ces deux précédentes classes. Malgré leur proximité, il n'est pas possible de définir avec précision les interactions entre ces 3 classes de VT. Néanmoins, nous pouvons indiquer que les VT-1 et VT-5 partagent des caractéristiques temporelles qui permettent de les regrouper dans un même lignage, et qui est différent du VT-2. Du point de vue statistique, il a été possible de localiser 963 séismes, soit 19 % des détections. En 2022, ce pourcentage était de 18 %.

Hypocenter re-location of volcanic seismicity (2023.01.01-2023.12.31)

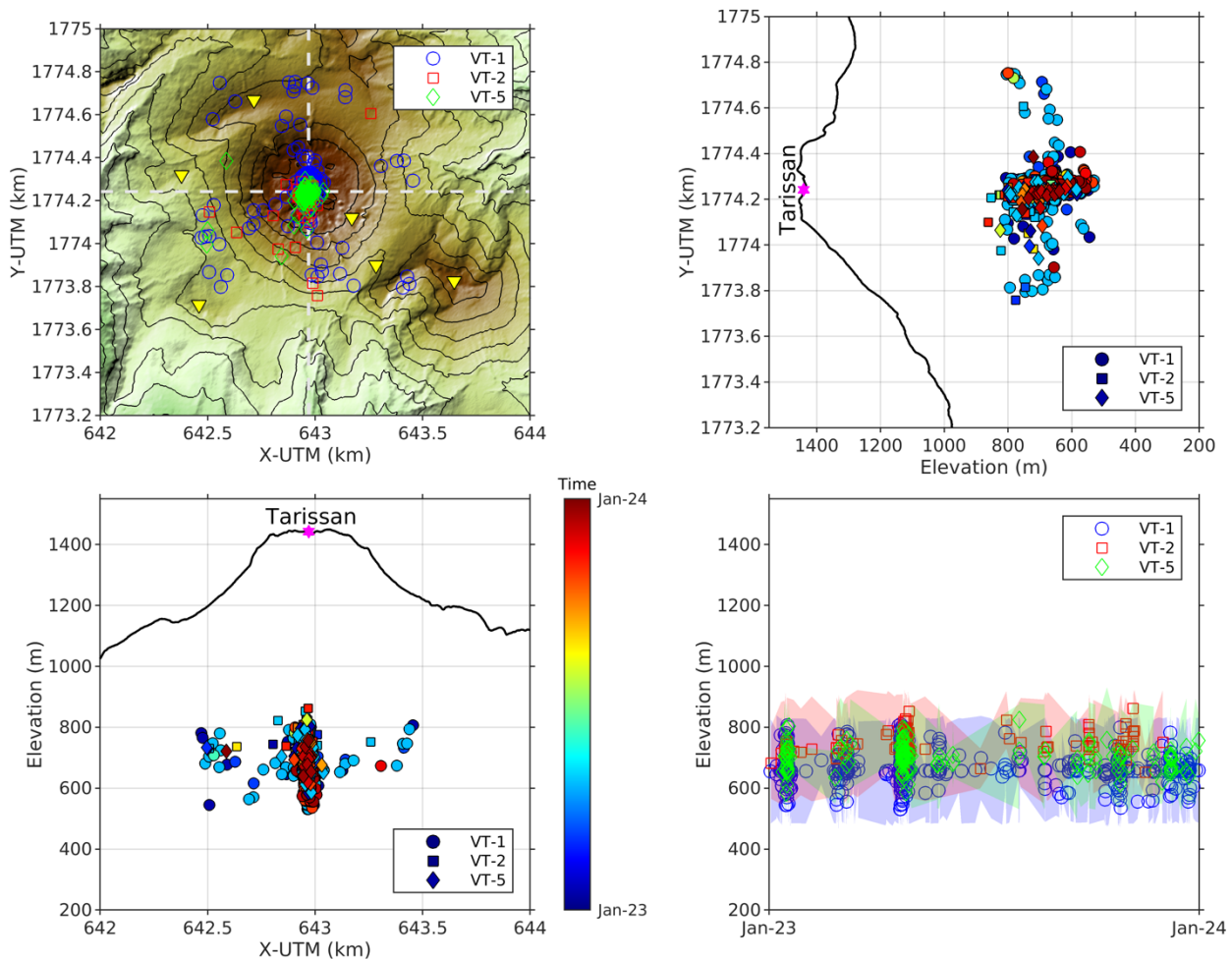


Figure 5. Localisation des répéteurs sismo-volcaniques à la Soufrière de Guadeloupe pour l'année 2023. (Haut-gauche) Localisation en carte des séismes Volcano-Tectoniques (VT) par classe de répéteur. (Haut-droite) Coupe nord-sud passant par le Gouffre Tarissan montrant la localisation des séismes VT. (Bas-gauche) Coupe ouest-est passant par le Gouffre Tarissan montrant la localisation des séismes VT. La couleur indique le temps au cours de l'année 2023. (Bas-droite) Évolution temporelle de la profondeur des séismes VT par classe de répéteur



Caractérisation du catalogue des répéteurs sismiques

Une façon d'analyser un catalogue de sismicité est de définir la relation de Gutenberg-Richter qui quantifie la proportion des petits séismes par rapport aux grands séismes (Fig. 6). Pour une sismicité habituelle, la distribution en nombre cumulée d'événements d'une magnitude supérieure à un seuil suit une décroissance linéaire en échelle logarithmique. Pour les faibles magnitudes, on observe un plateau qui caractérise la limite de détection instrumentale d'un réseau. La décroissance linéaire est caractérisée par un facteur appelé b-value, qui correspond donc à la pente de cette décroissance. En 2023, la b-value moyenne est de 1.89 qui est une valeur classique pour une sismicité de système hydrothermal à faible profondeur (Fig. 6), et qui est identique à la valeur de 2022.

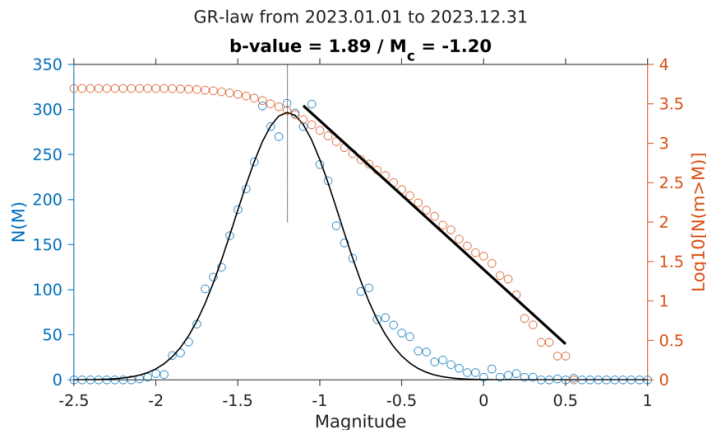


Figure 6: Relation de Gutenberg-Richter pour les séismes Volcano-Tectoniques (VT) de l'année 2023. La courbe bleue présente la distribution du nombre d'événements détectés par gamme de magnitude. La courbe rouge présente la distribution cumulée du nombre d'événements (en log décimal) supérieure à une magnitude donnée.

L'analyse temporelle de ce paramètre montre une variation dans une gamme allant de 1.25 à 3 (Fig. 7). La croissance de ce paramètre peut ainsi indiquer la pressurisation du système hydrothermal et la soudaine chute de la b-value un relâchement de la contrainte accumulée. Les b-value les plus faibles correspondent ici aux périodes d'activité sous forme d'essaims sismiques.

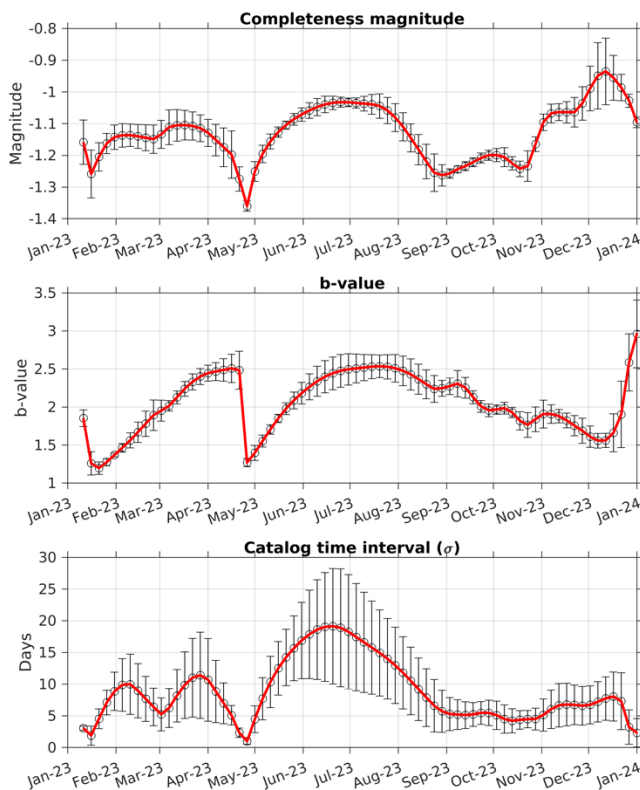


Figure 7: Évolution temporelle des paramètres du catalogue des séismes Volcano-Tectoniques (VT) issue de la relation de Gutenberg-Richter. (Haut) Magnitude de complétude indiquant la limite de détection instrumentale du réseau. (Milieu) b-value indiquant la décroissance linéaire du catalogue de sismicité volcanique. (Bas) Intervalle de temps représentatif de la valeur des paramètres de la relation de Gutenberg-Richter.



> Déformation

GNSS permanent

Le réseau GNSS permanent 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 sources de déformation (généralement un apport de fluides hydro-magmatiques) 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.

A l'échelle de la zone du sud de Basse-Terre, les déformations mesurées par GNSS, ne montrent pas de gonflement qui pourrait traduire l'apport de magma en profondeur (non-illustré). A l'échelle de l'édifice, les données des cinq dernières années (Fig. 8 gauche) montrent une déformation horizontale radiale du sommet du volcan (entre 5.2 (F562) et 14 mm/an (CRA2)), à laquelle se rajoute un mouvement vers le sud-ouest du flanc sud de la Soufrière (entre 5.3 et 6.7 mm/an pour les sites F802, BULG, AGAL). Cette déformation reflète la surpression du système hydrothermal, et l'échappement des gaz pressurisés dans le réseau de fractures du dôme de La Soufrière. Les vecteurs des 12 derniers mois (Fig. 8 droite), s'inscrivent dans cette tendance, bien que les vitesses d'ouverture du sommet (entre 3.0 (F562) et 13.2 mm/an (CRA2)) et le glissement du flanc sud (entre 2.1 et 5.6 mm/an pour les sites F802, BULG, AGAL) soient légèrement en baisse.

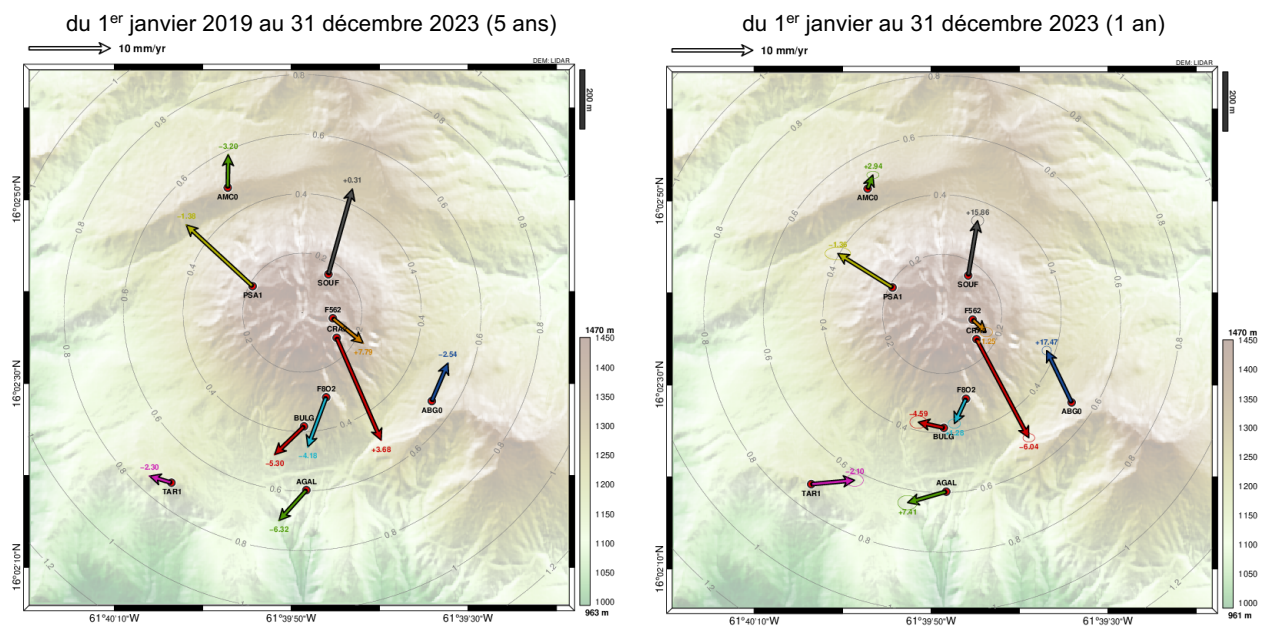


Figure 8. Déformation du dôme de la Soufrière enregistrée par le réseau GNSS permanent : moyennes sur 5 ans (gauche) et sur 1 an (droite). La taille de la flèche et la valeur indiquée en haut à gauche indiquent la vitesse horizontale moyenne en mm par an, mesurée sur une période de 5 ans ou 1 an. Le chiffre au bout de chaque flèche indique la valeur de la vitesse verticale, positive pour une élévation, négative pour un affaissement. Les ellipses représentent l'incertitude sur la position horizontale de l'extrémité du vecteur horizontal de déformation. Tous les vecteurs sont normalisés au déplacement régional selon ITRF14 (International Terrestrial Reference Frame). Calculs réalisés avec le logiciel GipsyX/JPL. Source WebObs/IPGP.

Les vitesses observées par GNSS sur le dôme peuvent être modélisées par une source de pression très superficielle, localisée sous la zone des fumerolles Napoléon à environ 100 m de profondeur seulement, et correspondant à une variation de volume ponctuelle ΔV de $+13.000 \pm 800$ m³/an sur 5 ans (2019-2023), et de $+1600 \pm 400$ m³/an sur 2023 (Fig. 9).

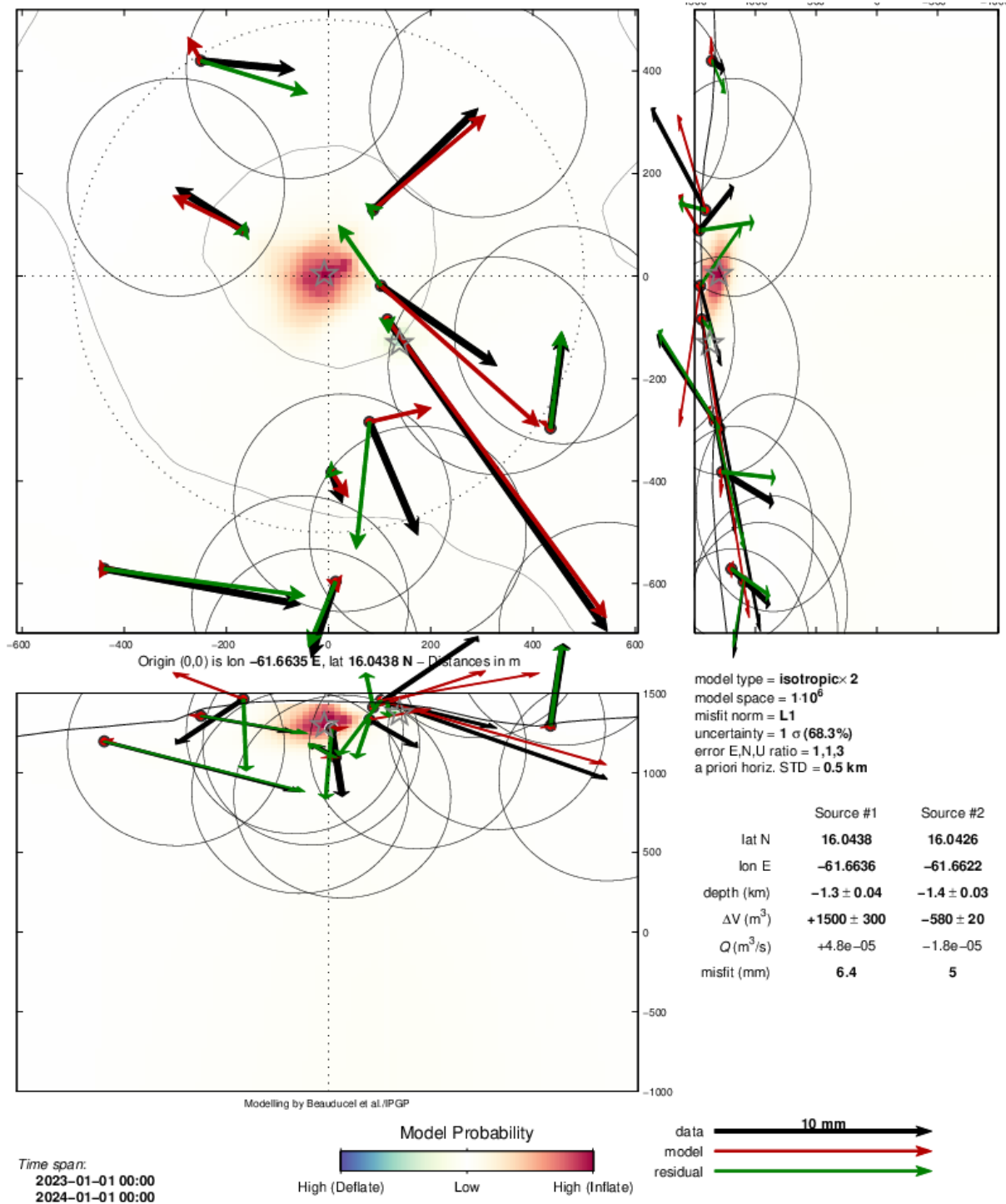


Figure 9. Modélisation 3D des déplacements GNSS durant l'année 2023 par inversion bayésienne d'une source de déformation simple et unique, vu en plan et en coupes verticales Est-Ouest et Nord-Sud : les zones colorées correspondent à la probabilité d'existence de cette source à un emplacement donné (le rouge correspondant à une source en inflation), une étoile indique la position de probabilité maximale, vecteurs déplacement (flèches noires et ellipse d'erreur), vecteurs modélisés (flèches rouges), résidus (flèches vertes). Le centre de la figure correspond au Gouffre Tarissan. Source WebObs / IPGP.



Les distances entre stations GNSS permanentes (baselines) et leurs évolutions entre 2019 et 2023 sont rapportées sur la figure 10. Cette figure montre que 1) l'ouverture du dôme s'est accélérée en 2020, et 2) la base du dôme est relativement statique à l'exception du secteur sud-est (AGAL – ABG0 – trait bleu) en ouverture. En 2023, les mouvements d'éloignement des stations du sommet (PSA—SOU ; PSA —CRA) semblent ralentir, en accord avec la légère baisse de la vitesse d'ouverture du dôme et les tendances à la fermeture des grandes failles enregistrées par les mesures d'extensométrie.

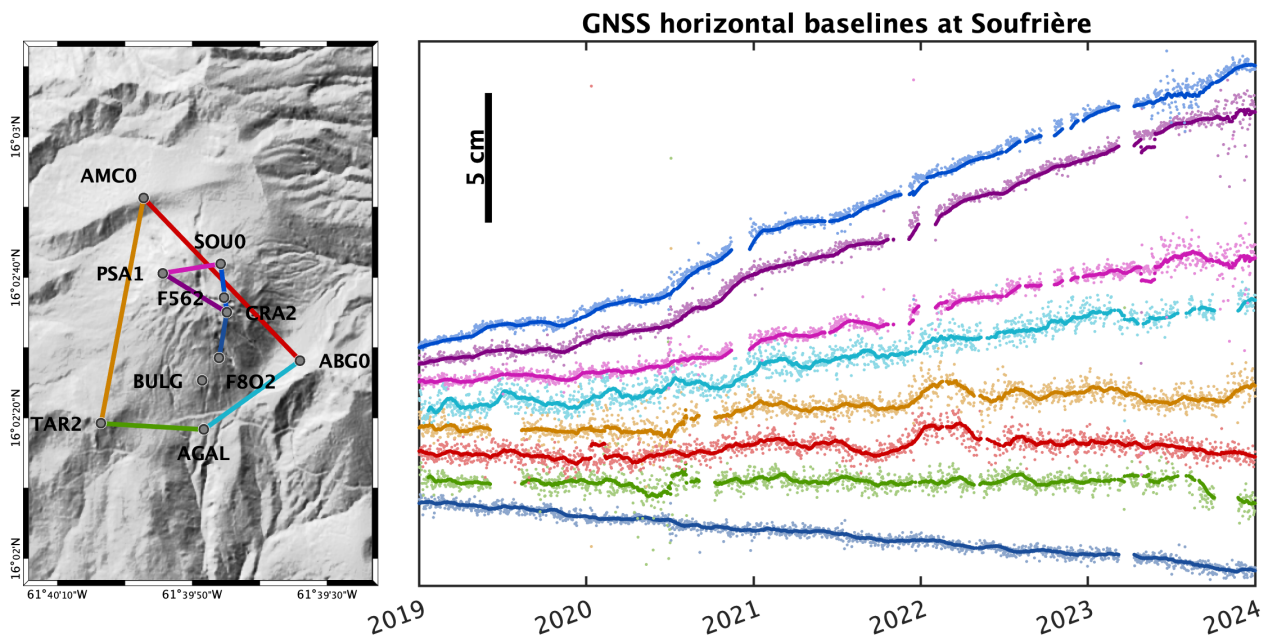


Figure 10. Evolution 2019-2023 des distances entre stations GNSS permanentes (baselines). Calculs réalisés par le logiciel GipsyX/JPL, graphe réalisé par F. Beauducel/IPGP.

GNSS répétition

Les campagnes répétées de mesures GNSS basées sur un grand nombre de stations permettent d'affiner les observations faites avec le réseau permanent. En 2023, une campagne de mesure a été réalisée (3 au 24 Mai 2023, J.B. de Chabalière) avec 37 stations déposées pendant au moins 5 jours sur et autour du volcan.

A l'échelle de la zone du sud de Basse-Terre, la plupart des déplacements sont inférieurs à 5mm/an et ne montrent pas de tendance claire à l'inflation ou la déflation (Fig. 11 gauche). Les plus grands vecteurs (MOMA ainsi que CLAF, DUCH, TRIV, CHAP et CAFR) n'ont été mesurés que 2 fois à deux ans d'intervalle (installés en 2021) et leur incertitude reste encore grande. Sur le flanc est de la Soufrière, les vitesses importantes des sites RCB1 et ACCB (5mm/an) pourraient refléter une instabilité gravitaire du flanc est du volcan (Fig. 11 droite).

A l'échelle du volcan, les mesures répétées confirment l'inflation radiale du sommet. Elles montrent que cette déformation ne se propage pas à la base du dôme au nord et à l'est (AMC1, AMC0, TRC2, CRC2, ABG0, ECH1). Cependant, elle se prolonge plus loin au sud et à l'ouest, formant une instabilité (glissement de flanc).

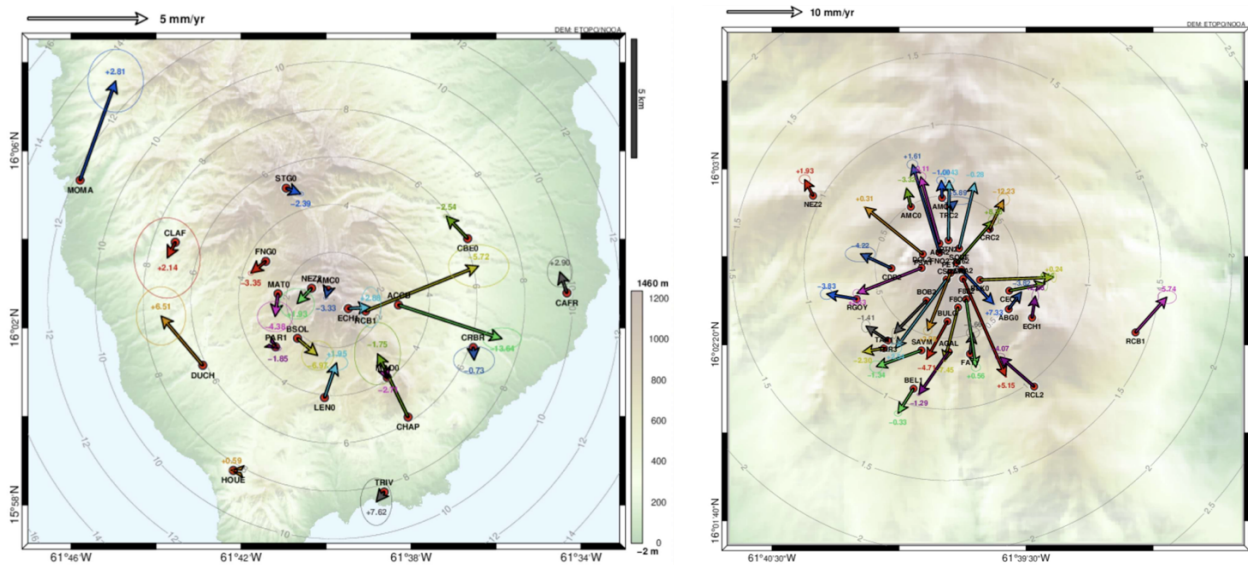


Figure 11. Déformations enregistrées sur une période de 5 ans par les mesures GNSS répétées (campagne 2023, J.-B. de Chabalier). Gauche : à l'échelle du sud Basse-Terre. Droite : à l'échelle du volcan de la Soufrière. Graphes réalisés par le logiciel WebObs/OVSG.

Extensométrie

Depuis l'installation du réseau d'extensométrie en 1995, la déformation du dôme est caractérisée par un phénomène d'ouverture de certaines fractures radiales (Napoléon/8 juillet 1976, 30 août 1976) simultanément à la fermeture d'autres (Fente du Nord, Lacroix, Dolomieu), avec des vitesses moyennes entre +5 mm/an et -3 mm/an. Ceci se traduit notamment par la fermeture de la zone Est du Gouffre Dupuy (site DUP2, rond rouge, Figs. 12 et 13) et l'ouverture de la fissure Napoléon au niveau du cratère éponyme (rond vert, site NAP1) au nord-ouest, et du site F8J1 au sud-est (faille du 8 Juillet 1976, carré vert) (Figs. 12 et 13). Sur le flanc sud, la faille du 30 Aout (site F302, rond bleu) est également en ouverture.

En 2021, la fermeture du Gouffre Dupuy Est s'accélère, alors que l'ouverture des autres sites ralentit (NAP1, F302) ou s'arrête (F8J1). La fracture Dolomieu (DOL2) entame également une fermeture beaucoup plus marquée. Cette tendance s'accroît en 2023, avec l'arrêt de l'ouverture du cratère Napoléon (phénomène qui a déjà été observé en 1999-2002 et en 2012-2015), et la fermeture de la partie Est de la faille Napoléon/8 juillet au niveau du site F8J1. Plus bas, la faille du 30 Août semble également amorcer une fermeture. Au premier ordre ces tendances à la contraction des grandes failles sommitales sont cohérentes avec les données GNSS qui indiquent un ralentissement de l'ouverture du dôme. La déformation du sommet du dôme peut être expliquée qualitativement par un déplacement vers l'Est de la zone de pression en accord avec l'extension de la zone fumerolienne.

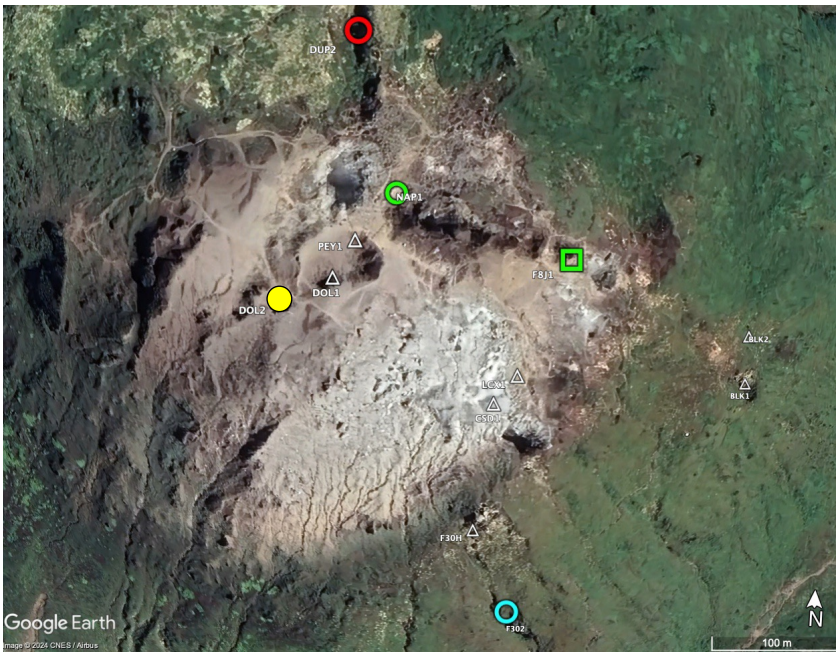


Figure 12. Localisation des sites de mesure « extensométrie ». Les trois sites mentionnés dans le texte sont indiqués en couleur : Gouffre Dupuy 2 (DUP 2, rond rouge), NAP1 (Cratère Napoléon, rond vert), F8J1 (faille du 8 Juillet 1976, carré vert), F302 (faille du 30 Aout, rond bleu).

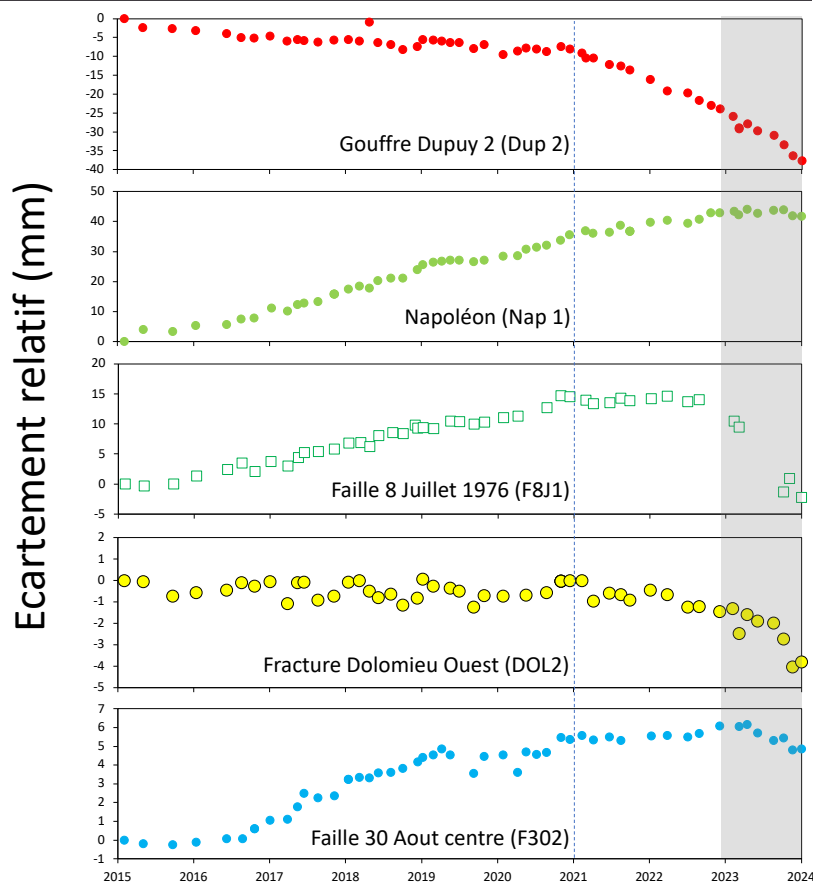


Figure 13 : Mesures d'extensométrie illustrant le changement de comportement des failles au sommet de la Soufrière en 2021 et en 2023. Données WebObs/OVSG.



> Activité fumerolienne et chimie des gaz

L'activité fumerolienne et la composition des gaz sont suivies par (1) des mesures de température et des prélèvements (ampoules de Giggenbach, et condensats) réalisées dans les bouches des fumerolles, les prélèvements étant analysés dans les laboratoires de l'OVSG et les laboratoires partenaires en métropole; et (2) des mesures de la composition des gaz réalisées in situ dans le panache dilué à une distance de quelques mètres à dizaines de mètres des événements fumeroliens. Ces mesures, réalisées à l'aide d'un analyseur MultiGAS portable, ne sont répétées régulièrement que depuis 2016.

Les mesures de température et de composition des gaz aux événements Cratère Sud et Napoléon Nord sont illustrées sur les figures 14 et 15. La composition des panaches dilués est rapportée sur la figure 16.

Observations et mesures aux événements des fumerolles

Secteur Cratère Sud : Les événements de la fissure Cratère Sud ont beaucoup évolué entre 2020 et 2023. Les événements Cratère Sud Nord (CSN) et Cratère Sud Sud (CSS), constitués en 2020-2021 par de petits orifices émettant des gaz sous pression à haute vitesse, ont laissé place à de larges bouches toujours très actives, et au fond desquelles il est possible d'apercevoir une phase fluide sombre qui est très probablement du **soufre liquide** (photo de couverture). Parallèlement, le seul événement accessible, Cratère Sud Centre (CSC), a cessé d'être actif en 2021. Pour des raisons de sécurité, les gaz ne sont plus échantillonnés sur ce site depuis 2021, mais la composition du panache de gaz est régulièrement mesurée à distance (voir section multigas). Les mesures de température ont également cessé en 2021, mais ont été reprises en 2023 avec un système de mesure déporté (site CSN), des mesures par caméra thermique (sites CSN et CSS, Fig. 14) et des sondes de températures permanentes installées à l'été 2023 par le groupe de l'ANR MegaMu (sondes actives quelques semaines).

La reprise du suivi thermique de la fissure a révélé une envolée des températures en 2023. Jusqu'à présent les températures des fumerolles de la fissure Cratère Sud ont fluctué autour de la température d'ébullition de l'eau à l'altitude du sommet (95 °C), avec des incursions régulières à 110°C (2001, 2013, 2018) et une incursion à 130°C en 2007. Les mesures réalisées en 2023 ont révélé des températures durablement dans la zone des **200°C à CSS (maximum 212°C) et 140-150°C à CSN**, qui expliquent la présence de soufre liquide dans les bouches (la température de fusion du soufre étant comprise entre 115 et 120°C). Les températures les plus élevées ont été mesurées en fin de saison sèche (Aout), mais ne sont pas beaucoup redescendues avec l'arrivée de la saison pluvieuse (190-200°C mesurés à CSS en décembre). On notera que **les températures relevées en 2023 à CSS sont les plus élevées mesurées dans les fumerolles de la Soufrière**, le précédent maximum (180°C) ayant été mesuré sur une fumerole active pendant la crise éruptive de 1975-1977 (Feuillard et al., 1983).

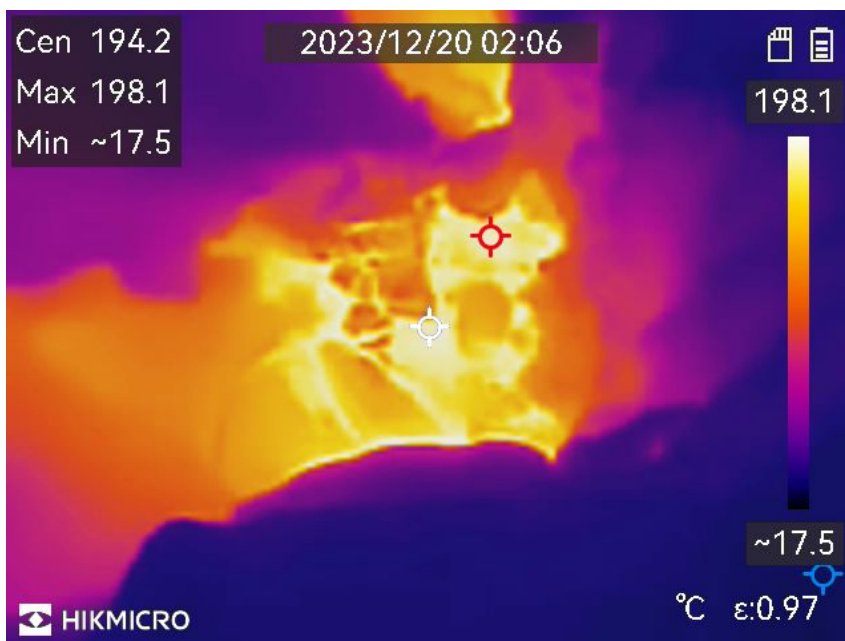


Figure 14 : Image thermique de la bouche sud (CSS) de la fracture Cratère Sud (Décembre 2023). Image prise à partir du bord Est de la fracture. Des températures proches de 200°C ont été mesurées tout au long de l'année 2023 à l'événement CSS.

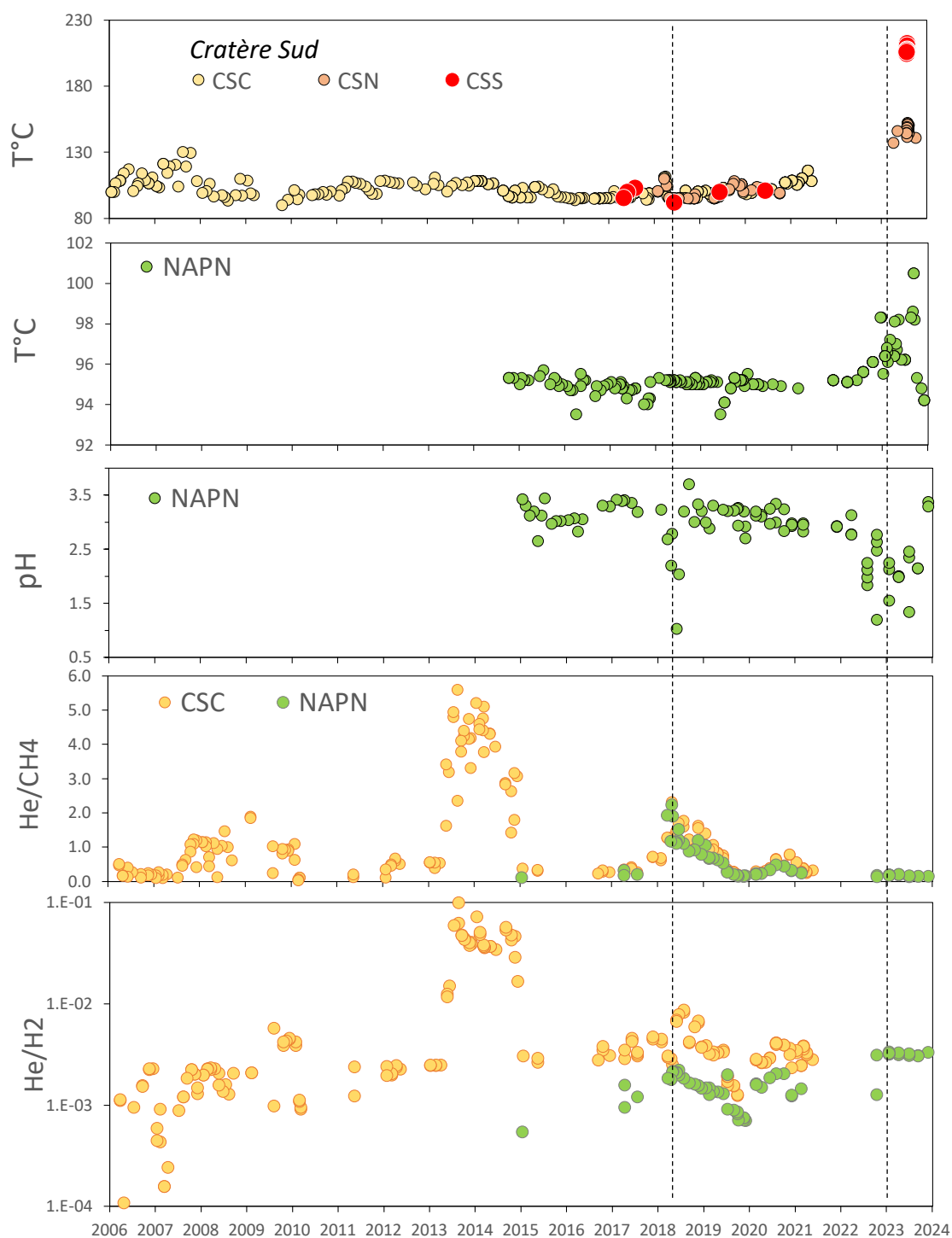


Figure 15 : De haut en bas : température des événements de la fissure Cratère Sud (CSS, CSC, CSN), température de l'événement NapN, pH des condensats de l'événement NapN, rapports He/CH₄ et He/H₂ des gaz prélevés (ampoule de Giggenbach) aux événements NapN et CSC (éteint en 2021).



Secteur Napoléon Nord : Depuis son apparition en 2014, la température de l'évent Nap-Nord est restée proche de la température d'ébullition de l'eau hormis de brefs refroidissements attribués à des précipitations intenses. Pour la première fois, fin 2022, la température de l'évent a fait une incursion (98.3°C) nettement au-delà de 95°C (Fig. 15). La température est restée généralement au-dessus de 96°C en 2023, avec une incursion à 100.5°C en septembre. Contrairement à la fumerolle Cratère Sud, la température de Napoléon Nord est retombée après les pluies d'octobre (tempêtes Philippe et Tammy). Le pic de température octobre 2022 – septembre 2023 est associé à des condensats de gaz plus acides (pH 1.2 à 2.5) que la normale (pH 3 à 3.5) rappelant les pH mesurés pendant la crise du printemps 2018 (mais cette crise n'avait pas produit d'anomalie de température à NapN) (Fig. 15). Le pic de température et de pH n'a pas été associé à un changement majeur de la forme ou de l'activité de la fumerolle NapN.

Après l'extinction de la fumerolle CSC en 2021, la fumerolle NapN est devenue le site de référence pour le suivi de la composition des gaz. Les abondances relatives des gaz non-condensables y sont remarquablement uniformes depuis la reprise des analyses à l'OVSG en octobre 2022 (Fig. 15). Ces compositions récentes se caractérisent par (1) des rapports He/CH₄ proches de la ligne de base observée depuis 2014, et (2) des rapports He/H₂ en légère augmentation (par rapport à 2021 et avant), mais toujours dans la gamme normale (par opposition aux pics liés aux crises de 2009, 2014 et 2018). On note qu'il existe une augmentation à long terme de la ligne de base du rapport He/H₂, bien visible dans la série CSC. La fumerolle NapN qui montrait initialement des rapports He/H₂ très bas a rattrapé cette tendance en quelques années, et présente depuis fin 2022 des rapports He/H₂ identiques à ceux de CSC avant son arrêt en 2021.

Secteur Napoléon Est : La fumerolle Napoléon Est (NapE) apparue en février 2016 a beaucoup évolué les premières années (migration, colmatage, réactivation, projection de boue) et s'est agrandie jusqu'à 2018. Depuis, l'activité de la bouche est fluctuante. Le principal événement NapE1 a continué à évoluer en 2023, en s'approfondissant de 1 à 2 m en début d'année.

Gouffre 56 : Le Gouffre 1956 réactivé depuis 2007, montre des forts débits, assez stables après l'augmentation significative débutée en septembre 2015. Le panache reste très acide en 2023 (pH de 1.19 mesuré dans les vapeurs diluées collectées par condensation passive). Cette acidité, et plus généralement l'humidité, nous ont conduit à désinstaller l'analyseur mutligaz permanent.

Fracture Lacroix : La fracture Lacroix réactivée en 2011, montre une activité en augmentation, avec des dépôts de soufre sur les parties basse et haute. Sa température dépasse 90°C (caméra thermique).

Gouffre Hammouya : Une activité fumerolienne associée à une dégradation de la végétation se développe à proximité du site « Gouffre Hammouya » sur le flanc sud-est. Une température de 70°C a été mesurée par caméra thermique. Un trou chaud (58°C) est également apparu sur le chemin fin décembre. Ces observations indiquent que le secteur est en évolution et instable.

Extension de l'activité fumerolienne : L'activité fumerolienne continue de se développer sur la partie nord et est du dôme. De nombreux points de dégazage se développent à l'est de la fissure Napoléon : (a) entre NapN et le Gouffre Tarissan ; (b) sur la paroi est du Gouffre Tarissan ; (c) sur le flanc sud du cratère Napoléon et au sommet du morne qui surplombe le cratère ; (d) le long du chemin entre Napoléon Est et Napoléon Nord. Les petits événements le long de ce chemin présentaient en fin d'année 2023 des températures anormalement élevées (99 - 102°C, contre moins de 96°C habituellement). Ces anomalies thermiques précèdent des projections d'argile observées au site NapE1 en janvier 2024.

Analyse du panache de gaz

L'analyse du panache de gaz dilué est réalisée sur place à l'aide d'un analyseur MultiGAS portable. Pour s'affranchir de la dilution du panache de gaz dans l'air, la composition des gaz est caractérisée par les quantités relatives entre espèces gazeuses (rapports molaires). Entre 2019 et mars 2023, les données montrent une augmentation continue du rapport SO₂/H₂S et une relative stabilité du rapport CO₂/H₂S sur les sites CSN, NapN et Gouffre 56 (Fig. 16). L'augmentation du rapport SO₂/H₂S est moins visible sur le site NapE1, et absente dans les panaches de gaz émis par le Gouffre Tarissan, ainsi qu'à l'extrême sud de la fracture Cratère Sud à proximité du Gouffre CS, probablement à cause de la dissolution du SO₂ dans les lacs présents au fond des gouffres.

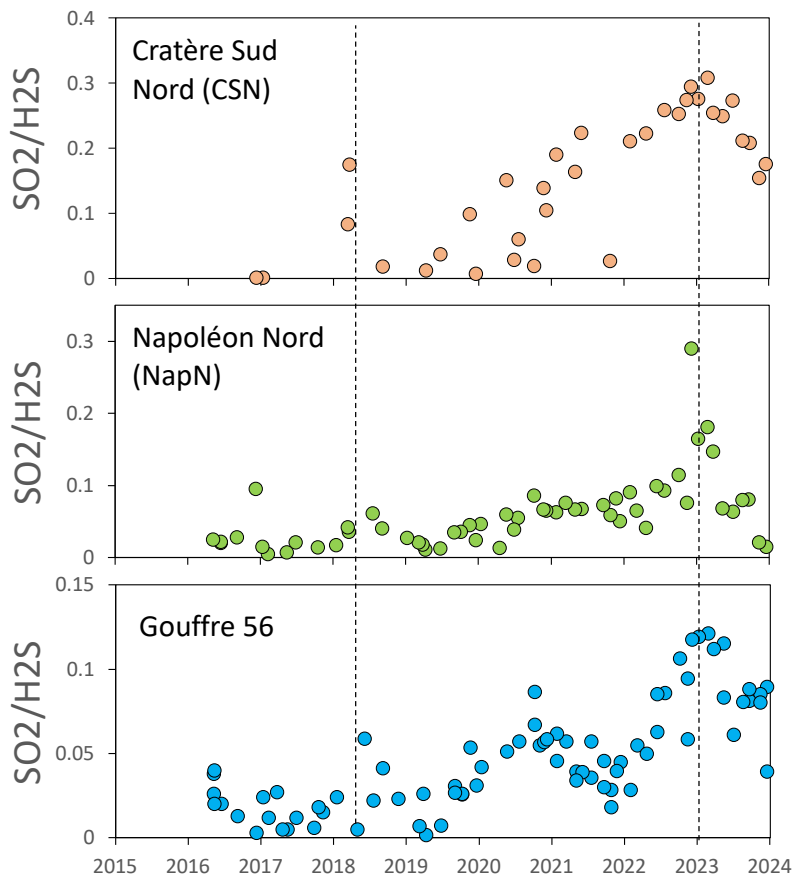


Figure 16. Evolution de la température et du rapport SO_2/H_2S dans le panache de gaz émis par le Cratère Sud (sites CSN, CSC et CSN, cf Fig. 3). Mesures réalisées par analyseur MultiGAS portable.

En mars 2023, les rapports SO_2/H_2S du panache de la Soufrière ont atteint leur maximum (jusqu'à 0.31 à CSN) depuis les premières mesures réalisées en 2006 par Allard et al. (2014). Un rapport SO_2/H_2S élevé est une signature des gaz magmatiques de haute température. Cependant, depuis environ mai 2023, les mesures réalisées montrent (a) une diminution des rapports SO_2/H_2S (au niveau de G56, NapN, et CS), et (b) une relative stabilité des rapports CO_2/H_2S , même si une tendance à la diminution semble se dessiner également depuis août 2023.

En résumé, les données acquises sur les panaches de gaz montrent une contribution croissante du SO_2 entre 2019 et début 2023, et une inversion de cette tendance au printemps 2023

Bilan et interprétation

L'augmentation importante de la température des fumerolles en 2022-2023 implique que la quantité d'eau disponible dans le système hydrothermal n'est plus suffisante pour tamponner la température à 95°C, en raison de l'assèchement de la nappe et/ou l'augmentation du flux de chaleur profond. Ce nouveau déséquilibre entre le flux de chaleur profond et la quantité d'eau disponible dans le système hydrothermal est en accord avec : (1) l'assèchement des gaz de la fumerolle Napoléon Nord, la production réduite de H_2 et l'augmentation du rapport He/H_2 , et (2) une dissolution plus faible de SO_2 dans les aquifères, et l'augmentation liée du rapport SO_2/H_2S dans les gaz. Concernant l'origine du déséquilibre, il est actuellement difficile de préciser les rôles respectifs de l'augmentation du flux de chaleur mis en évidence par Jessop et al., 2021, et de la baisse de pluviométrie sur la Soufrière avérée depuis plusieurs années (5445 m/an pour la période 2013-2022 contre 8568 m/an pour la période de référence 1981-2010, source : bulletins climatiques annuels météoFrance).

Pour conclure cette partie, il est important de souligner que les données de gaz inertes indiquent qu'il ne se produit **pas de changement majeur de la composition des gaz profonds** qui pourrait traduire une remontée de magma.



> Lac acide du Gouffre Tarissan

Le lac acide du Gouffre Tarissan montre ces dernières années des variations importantes de son niveau et de sa composition (Fig. 17), que l'on peut résumer par :

(1) Après une dizaine d'années d'approfondissement (passant de -90 à -120 m), le niveau du lac s'est rapidement élevé en 2022 reprenant en quelques mois pas moins de **40 mètres**. Depuis, le niveau s'est stabilisé dans la zone haute entre -80 et -90 m (toutes les profondeurs citées sont relative au point descente du système de prélèvement, situé 10 m au-dessus du pont naturel utilisé dans le passé comme point de référence).

(2) La phase finale d'approfondissement (2019-2021) est associée à une augmentation très importante de la concentration des métaux (Mg passant de 1000 à 7000 ppm), du chlore (de 1 à 4.6 moles par litre), et une baisse du pH (de 0 à -0.7) du lac. Ce phénomène de concentration des éléments est provoqué par l'évaporation quasi-totale du lac en accord avec son niveau très bas, proche du fond rocheux mesuré par deux fois à -125.5 m en 2023 (en accord avec la topographie faite par les spéléologues, Kuster et Silve, 1997).

(3) Suite à la remontée du lac en 2022, sa composition et son pH sont revenus à des valeurs normales proches de celles mesurées avant 2019.

(4) Les sulfates montrent un comportement particulier : leur concentration commence à augmenter en 2019 comme les autres éléments, mais chute en 2020 bien avant la remontée du lac (ligne pointillée, Fig. 17). Une explication probable est que la concentration en SO_4 est contrôlée par la solubilité du gypse ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), qui diminue fortement lorsque la concentration en HCl dépasse 3 moles par litre (Fig. 18). Enfin, après la remontée et la dilution du lac, en 2022 et 2023, la teneur en SO_4 est à nouveau contrôlée par la solubilité du gypse (Fig. 19). On observe cependant un léger excès de SO_4 , qui s'avère être une nouvelle caractéristique du lac (non observée depuis 2012) (Figs. 18 et 19).

Interprétation

Le niveau du lac reflète un équilibre complexe et variable entre les précipitations, les phénomènes d'évaporation/condensation, mais aussi le degré de fracturation/porosité ou de colmatage de son encaissant. La remontée brutale du niveau du lac fin 2021 n'est pas associée à un phénomène climatique anormal, la pluviométrie étant généralement en baisse au sommet du volcan de la Soufrière depuis plusieurs années (voir section météo). En revanche, la remontée du lac pourrait coïncider avec des signaux de type trémor harmonique (septembre et novembre 2021) produits par la migration de fluides dans l'édifice (Hebrard, 2023). L'automne 2021 est aussi caractérisé par un pic d'activité des fumerolles avec des projections solides d'argile. Cependant, la coïncidence entre ces phénomènes et la remontée du niveau du lac Tarissan ne peut être strictement établie, car la remontée du lac n'est pas précisément datée en raison de mesures malheureusement relativement espacées pendant cette période. Ces observations, et l'excès de sulfate apparu dans le lac après sa remontée suggèrent une réalimentation en fluides hydrothermaux profonds dans lesquels s'est dissout du SO_2 d'origine magmatique. En accord avec ce scénario, il a souvent été observé que le réchauffement et la mise en pression des systèmes hydrothermaux fait remonter le niveau des fluides hydrothermaux dans l'édifice voire peut conduire à des émissions de fluides à partir des fractures (ceci a par exemple été observé pendant toutes les éruptions phréatiques ou hydrothermales de la Soufrière et notamment en 1976-1977).

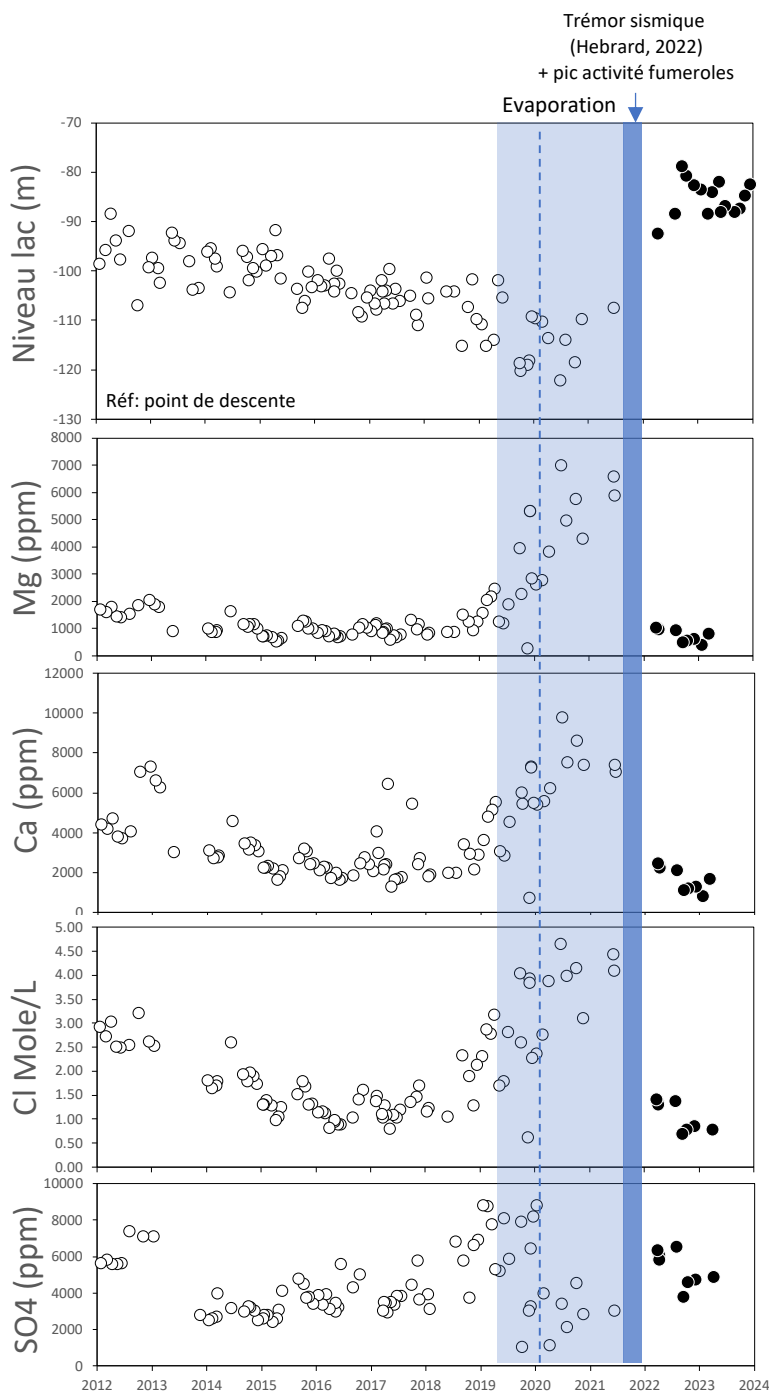


Figure 17 : Evolution du niveau et de la composition du lac Tarissan entre 2012 et 2023. Le niveau du lac est relatif au point de descente du système de prélèvement (1445 m), 10 mètres au-dessus du pont naturel séparant les Gouffres Dupuy et Tarissan (1435 m). La bande bleu clair indique la phase d'évaporation finale, pendant laquelle les éléments se concentrent fortement dans le liquide résiduel. La bande bleu foncé indique l'événement de remontée du lac, fin 2021. La ligne verticale en pointillée indique la baisse anormale de la concentration en sulfates pendant l'évaporation, alors que toutes les autres espèces continuent à se concentrer dans le liquide résiduel. Symboles ouverts : 2012-2021. Symboles fermés : 2022-2023.

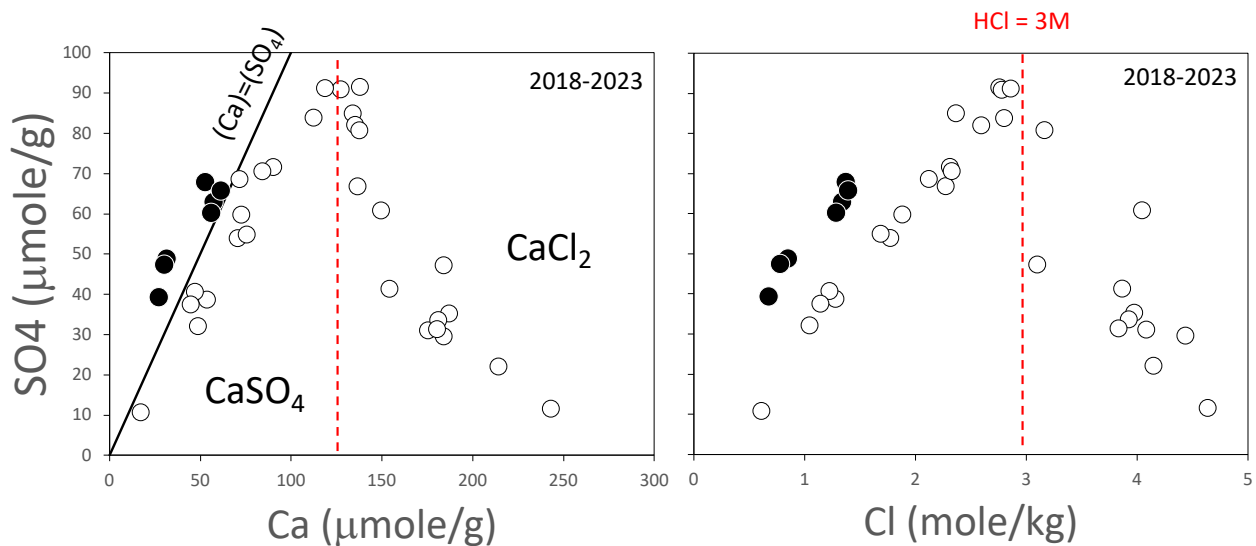


Figure 18. Relation Ca – SO₄ – Cl dans le lac acide Tarissan entre 2018 et 2023. Dans un premier temps (avant 2020), alors que le liquide est encore dilué, les concentrations molaires de Ca, SO₄ et Cl augmentent proportionnellement en préservant un rapport équimolaire (Ca)=(SO₄), indiquant que les concentrations en Ca et SO₄ sont contrôlées par la solubilité du gypse (CaSO₄.2H₂O). A partir de 2020, alors que la concentration de Ca atteint 130 µmole/g et continue à augmenter, la concentration en SO₄ chute brutalement (gauche). Cet événement se produit lorsque la concentration de Cl atteint 3 moles par litre environ (droite). Une explication probable est que CaSO₄ est remplacé par CaCl₂ au-dessus de 3 moles par litre d'HCl, diminuant fortement la solubilité des sulfates, en accord avec les données expérimentales (Li and George Demopoulos, 2005). Après la remontée du lac, en 2022 et 2023 (symboles fermés), les compositions reviennent sur la droite (Ca)=(SO₄), mais avec un léger excès de SO₄.

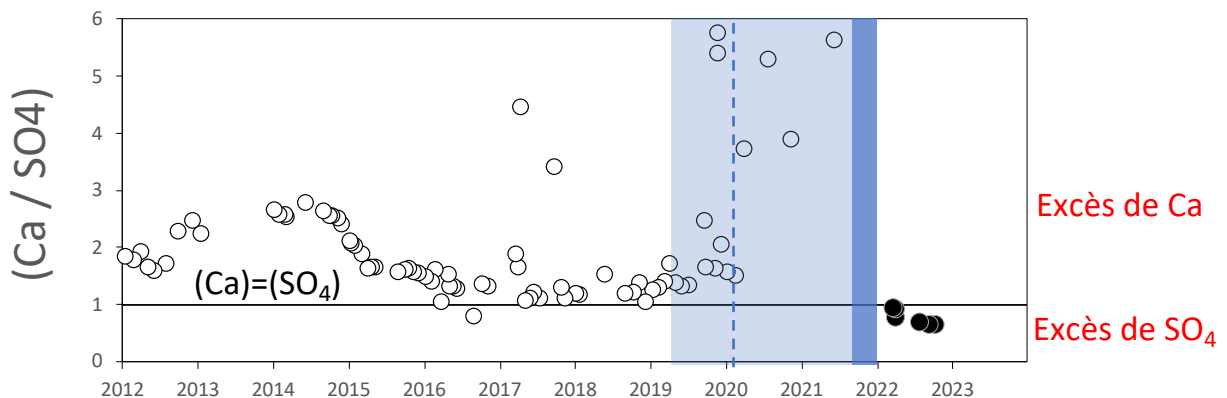


Figure 19. Evolution du rapport molaire (Ca)/(SO₄) dans le lac acide Tarissan entre 2018 et 2023. A partir de 2022, le lac présente un enrichissement en SO₄ relativement à Ca. Cette signature n'a pas été observée dans le passé récent.



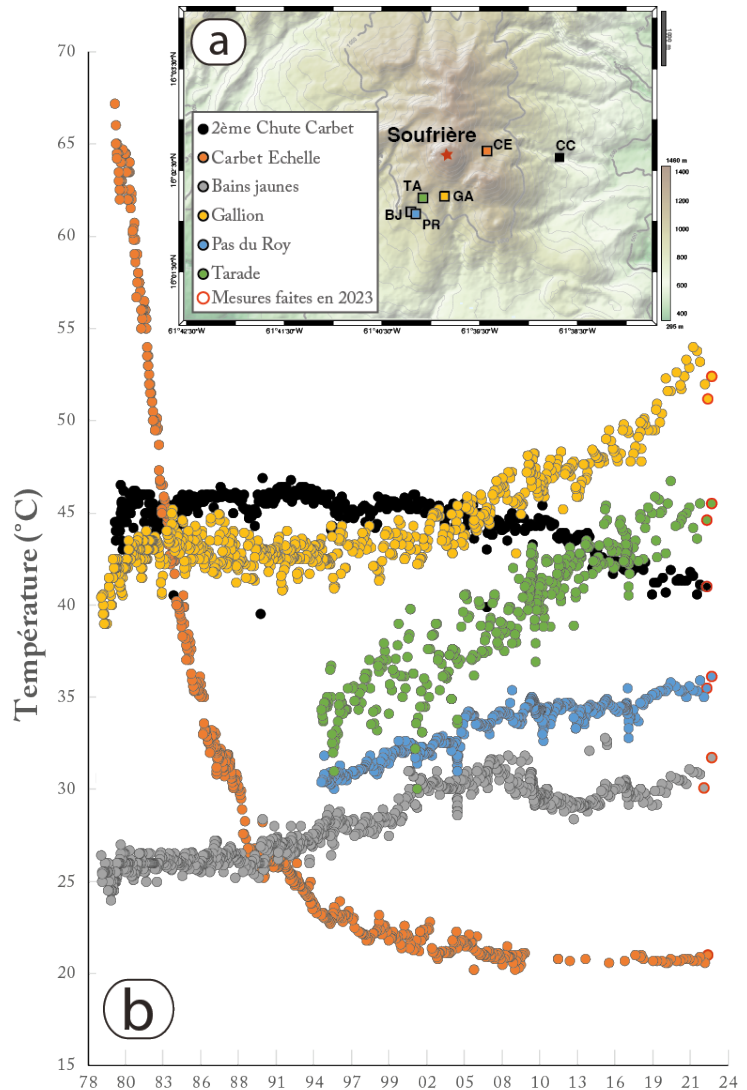
> Sources thermales

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 (Fig. 20). Depuis 1979, les Bains Jaunes (T moyenne de 31.2 °C en 2023) ont augmenté d'environ **+8.8 °C**, et Galion a augmenté de **+11.8 °C** (le refroidissement apparent de Galion en 2023 est produit par un mélange avec la source voisine Galion Blanc, laquelle montre des variations de température opposées). Depuis 1995, la source Pas du Roy (T moyenne de 35.8 °C en 2023) a augmenté de **+6.0 °C** et celle de Tarade (T moyenne de 45.1 °C en 2023) de **+16.7 °C**.

Inversement, les sources sur le flanc Est ont tendance à se refroidir : la source 2e Chute du Carbet (41.0 °C en 2023) a perdu 7°C depuis 1979, alors que la source Carbet Echelle s'est complètement déconnectée du système hydrothermal entre 1980 et 2008 (perte de 47°C).

Les températures des sources localisées sur le flanc Ouest de la Soufrière ne montrent pas de tendance décennale : Bains Chauds de Matouba (T moyenne de 58.6 °C en 2023 et de 58.5 °C entre 2008 et 2023) et Habitation Revel (T moyenne de 32.9°C en 2023 et de 32.7 °C entre 2008 et 2023). Les pH sont stables depuis plusieurs années, mesurés à 4.8 à Galion et 6.6 à la source de la 2e chute du Carbet.

Figure 20. Evolution de la température des principales sources chaudes depuis 1979 (a) Localisation des sources ; (b) Températures.



Les températures des réservoirs des sources (T_{res}), déduites du dernier équilibre de la silice entre roche et eau, varient entre 80 et 180°C (Fig. 21). Pour les quatre sources en réchauffement (Galion, Tarade, Pas du Roy et Bains Jaunes) on observe globalement une corrélation positive entre les températures mesurées et les températures des réservoirs, avec un rapport T_{res}/T_{mes} généralement entre 3 et 4. La température anormalement basse estimée pour Bains Chauds Matouba pourrait refléter la précipitation de silice à haute température (>225°C), indiquant un réservoir potentiellement très chaud pour la source la plus chaude de la Soufrière.

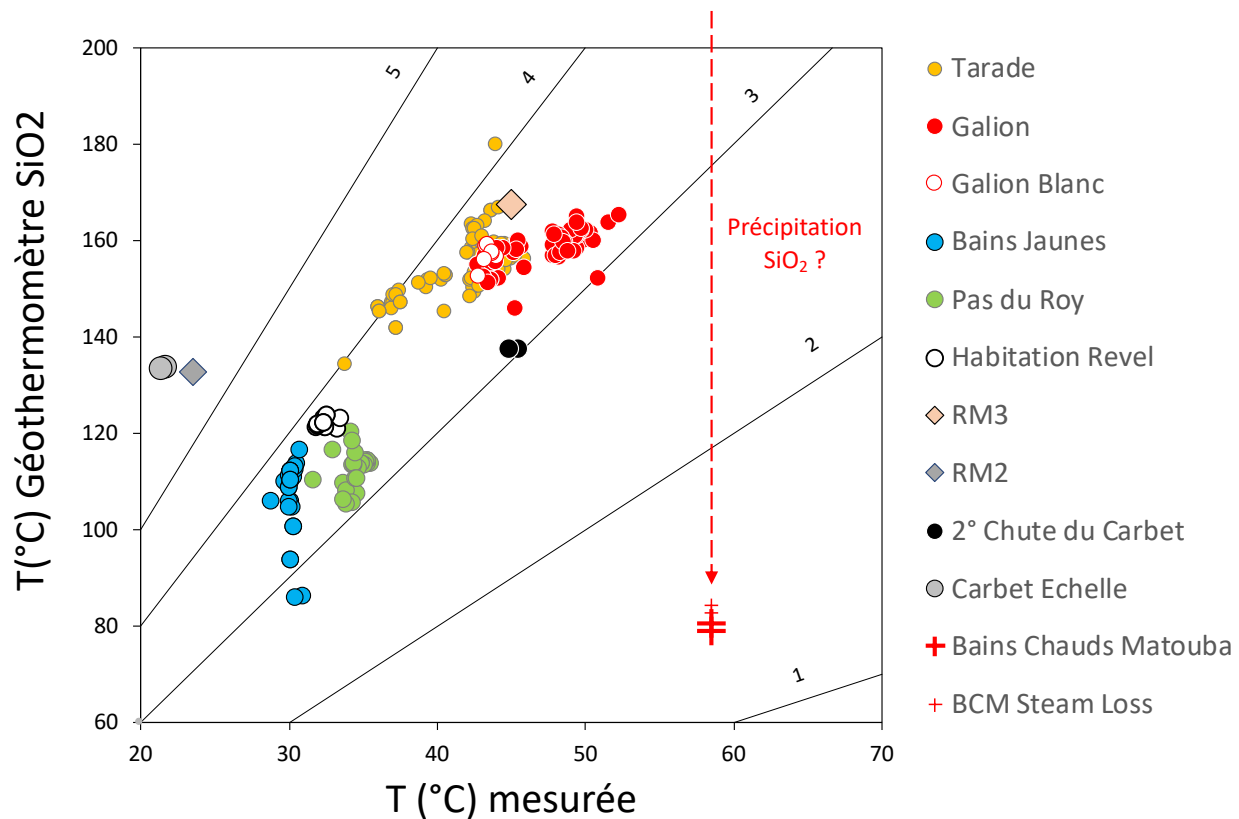


Figure 21. Températures déduites du géothermomètre SiO_2 rapportées en fonction des températures mesurées, pour les principales sources thermales de la Soufrière de Guadeloupe. Le géothermomètre applicable pour une perte de chaleur par conduction (sans perte de vapeur) est utilisé par défaut : $T(^{\circ}\text{C}) = 1309 / (5.19 - \log(\text{SiO}_2)) - 273.15$, où SiO_2 est la teneur en SiO_2 dissoute en mg/kg (ppm). Pour la source Bains Chauds Matouba, qui montre un dégazage important (bulles), le géothermomètre prenant en compte la perte de vapeur est également appliqué, selon $T(^{\circ}\text{C}) = 1522 / (5.75 - \log(\text{SiO}_2)) - 273.15$ (Fournier, R.O., 1977. *Chemical geothermometers and mixing models for geothermal systems. Geothermics 5 (1-4), 41-50*). Les concentrations en SiO_2 sont mesurées par titration dans les laboratoires de l'OVSG. Toutes les données disponibles des couples T_{SiO_2} - T_{mes} sont rapportées sur la figure (période 2004 – 2020). Les lignes correspondant aux rapports $T_{\text{SiO}_2}/T_{\text{mes}} = 1, 2, 3, 4$ et 5 sont indiquées. La précipitation de silice depuis un fluide à $T > 225^{\circ}\text{C}$ pourrait expliquer la teneur très basse de la source la plus chaude de la Soufrière (flèche rouge).

Sur la base de leur teneur en Na, Ca, Mg, SO_4^{2-} , Cl et HCO_3^- les sources thermales peuvent être divisées en 3 types principaux: eau Ca – SO_4^{2-} (BJ, CE, GA, TA, RM, PR, BCM), eau Ca – Na – HCO_3^- (HR) et une eau Ca – Na – Cl (CC). Les variations de composition sont généralement faibles et se produisent sur des échelles de temps décennales. Pour identifier d'éventuels changements récents, les compositions mesurées en 2023 sont comparées à celles des trois années précédentes (2020-2022). La figure 22 montre que les compositions des sources n'ont pas changé de façon importante en 2023. On note cependant (1) une petite augmentation de la teneur en Cl dans les sources du Galion (GA et GAB), (2) une légère hausse de la teneur en sulfates dans les sources Ravine Marchand 3, Ravine Goyavier 2, Bains Chauds Matouba, et Carbet Echelle, et (3) une légère baisse de la teneur en Mg dans les sources Galion, Galion Blanc, Tarade, et Ravine Goyavier 2.

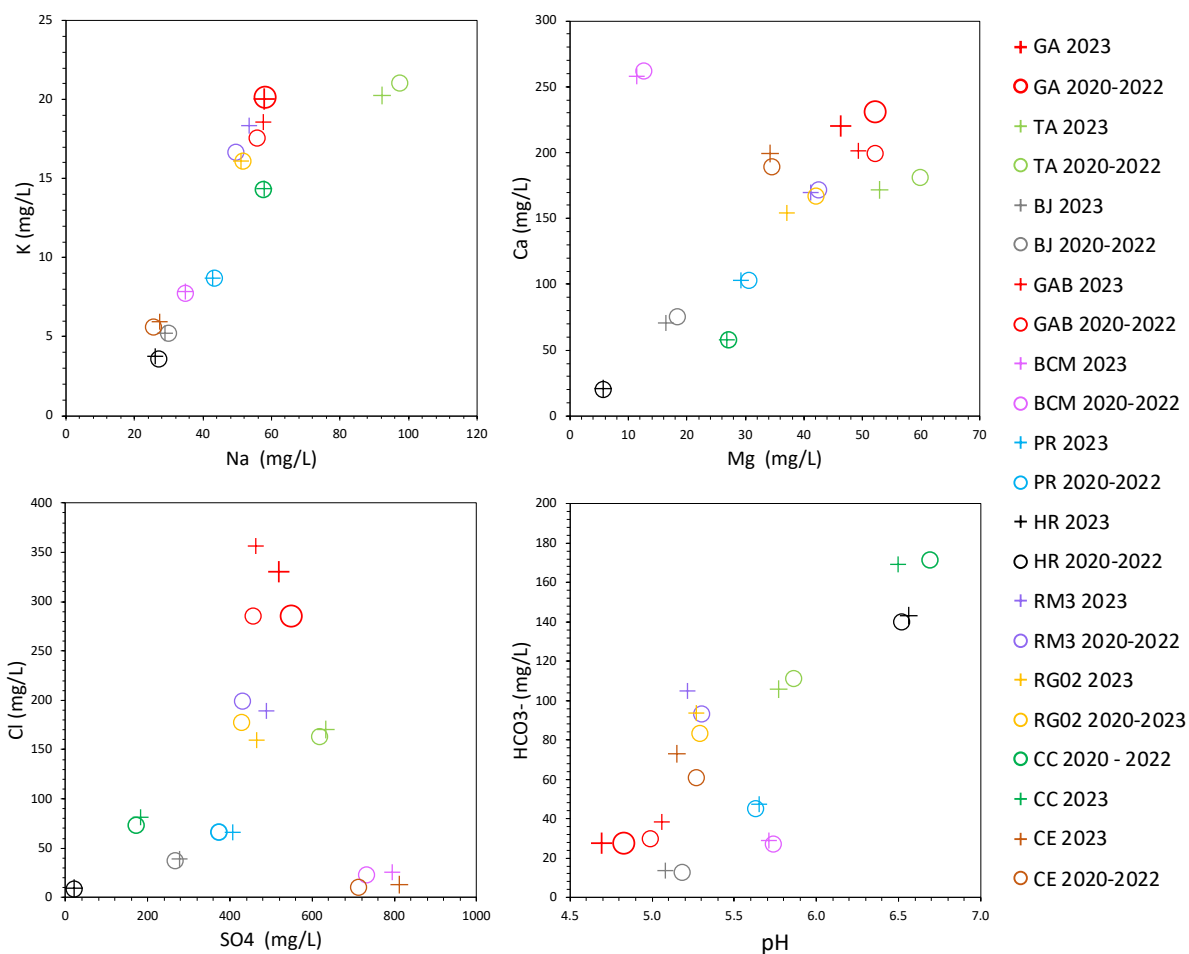


Figure 22 : Les compositions des sources mesurées en 2023 (croix) sont comparées à la moyenne des trois années précédentes (2020-2022).

> Météorologie au sommet

Au cours des cinq premiers mois de 2023 (jusqu'au début de la saison cyclonique) les vents ont soufflé à une vitesse moyenne de 37.2 km/h avec une orientation moyenne à +96°N. La station du sommet a enregistré une température moyenne de 15.3 °C et une pluviométrie cumulée de 1928 mm. Ces valeurs sont proches de celles mesurées en 2022 (T = 14.9°C et pluie = 1931 mm). De juin à décembre, les vents ont soufflé à une vitesse moyenne de 33.8 km/h avec une orientation moyenne à +108°N, mais avec une plus faible dispersion. La station a enregistré une température moyenne de 18.3°C. En revanche, malgré deux tempêtes (Philippe les 2-3 Octobre et Tammy le 22 Octobre), on observe une forte diminution de la pluviométrie cumulée de juin à décembre 2023 (2394 mm dont 608.4 mm cumulés lors des deux tempêtes) en comparaison avec la même période en 2022 (3787 mm).

Contrairement à 2022 (5718 mm), la pluviométrie 2023 au sommet (4323 mm) retombe dans la gamme basse (<5.5 m) des dernières années : 3981 mm en 2021, 4161 mm en 2020, 4423 mm en 2019, 5181mm en 2018. 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. Par exemple, il existe un lien possible entre le pic de précipitation de 2017 et les troubles du système hydrothermal de 2018.



3. Activité tellurique régionale

> Contexte

L'arc insulaire des Petites Antilles résulte du plongement de la plaque Amérique sous la plaque Caraïbe, à une vitesse de convergence de 2 cm/an. Elle provoque une déformation de la limite de ces plaques, faisant de l'archipel de Guadeloupe une région à forts aléas volcanique et sismique. Certains séismes sont directement liés aux processus de glissement entre les deux plaques. D'autres, plus superficiels, résultent de la déformation de la plaque Caraïbe. D'autres résultent de la rupture de la plaque océanique plongeant sous la Caraïbe. Durant la période historique, plusieurs séismes ont causé des dégâts et victimes en Guadeloupe (intensités supérieures ou égales à VII) : 1735, 1810, 1843 (destruction de Pointe-à-Pitre), 1851, 1897, 2004 (Les Saintes) et 2007.

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. 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

Au cours de l'année 2023, l'OVSG a enregistré **1701** séismes tectoniques dans la zone surveillée (rayon approximatif de 550 km autour de la Guadeloupe). Ce nombre est plus haut que l'année 2022 (838 en 2022) et dans la moyenne des onze dernières années (984 à 2368 séismes par année depuis 2012, Fig. 23). **La proportion de séismes localisés (52% soit 877 séismes) reste aussi élevée que les années précédente, malgré un plus grand nombre de petits séismes majoritairement localisés dans la région des Saintes.** De manière générale, sur les onze dernières années, le taux de séismes localisés était généralement anti-corrélé au nombre de séismes détecté parce que les petits séismes n'étaient pas localisés. Ce n'est plus le cas pour l'année 2023. Cette meilleure localisation des petits séismes résulte (1) de l'installation de la station sismique de Grand-llet (secteur des Saintes) en décembre 2022, et (2) de la mise en place en avril 2023 sur les serveurs de l'OVSG du code PHASEWORM pour la détection, classification, et localisation automatique des séismes par « machine learning ».

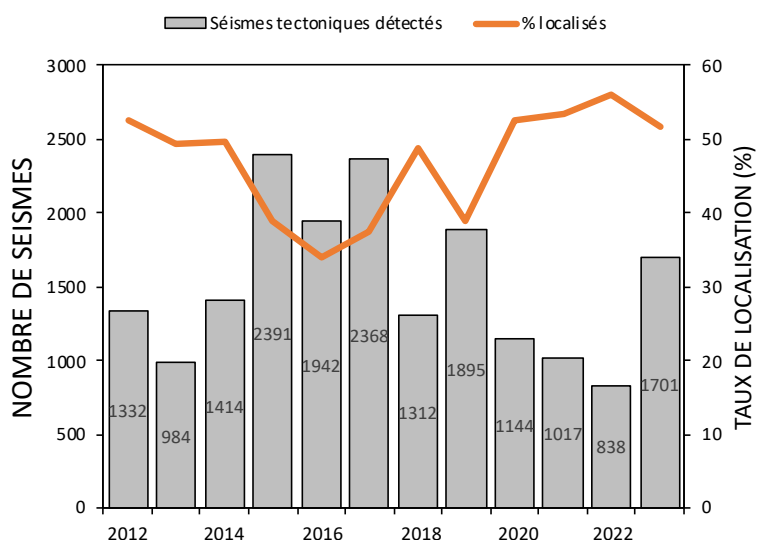


Figure 23. Nombre de séismes tectoniques détectés par le réseau de stations de l'OVSG entre 2012 et 2023 (échelle gauche) et taux de localisation (en %, échelle droite).



En 2023, les magnitudes moyenne (2.2) et maximale (6.0) des séismes tectoniques localisés dans le secteur couvert (Fig. 25) sont dans la gamme des valeurs des dix dernières années (respectivement 2.4 – 0.6 et 4.7 – 6.3). C'est aussi le cas pour les 10 (M10 = 5.5) et 30 (M30 = 4.9) séismes les plus énergétiques. A l'intérieur de cette période, **la magnitude moyenne 2023 (2.2) est supérieure aux valeurs 2017-2021 (≤ 1.7) et dans la gamme de valeurs 2012-2017 (1.6 – 2.4). Ainsi, la magnitude moyenne poursuit son augmentation depuis 2019.** Notons que la grande majorité des séismes ont une magnitude comprise entre 1 et 3 (Fig. 24). Cela représente 751 séismes.

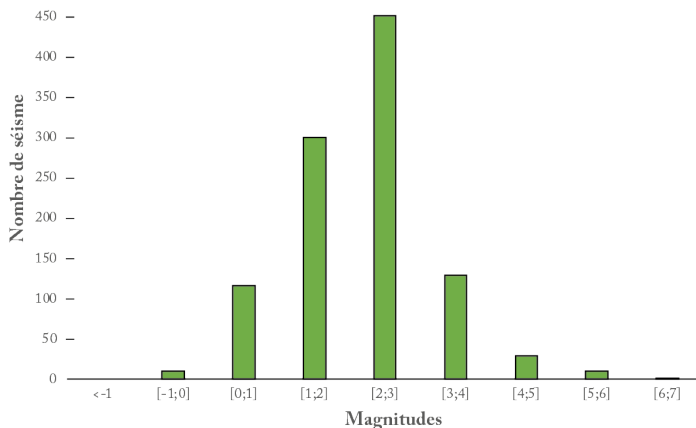
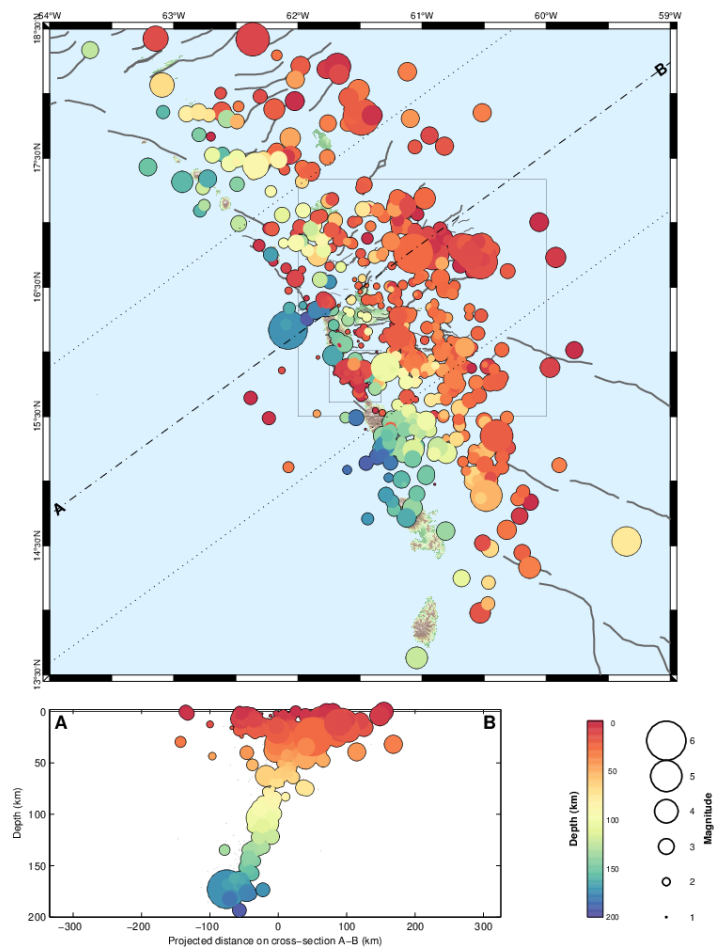


Figure 24. Histogramme des magnitudes des séismes tectoniques localisés par l'OVSG en 2023.

Localisation

La carte de la sismicité 2023 (Fig. 25) 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). La répartition géographique de l'activité sismique est comparable à celle des années précédentes.

Figure 25. Hypocentres et magnitudes des séismes localisés durant l'année 2023, 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.





Treize séismes ont été ressentis en Guadeloupe et sur les îles du Nord, et ont été l'objet de communiqués auprès de la préfecture, des mairies et des médias (Tableau 1).

Date	Magnitude	Profondeur (km)	Epicentre	Intensité max (*)
20/01/2023	5.9	184	27 km à l'ouest-nord-ouest de Bouillante	III - V
24/02/2023	3.9	8	71 km au nord de Saint-Martin	II - III
12/04/2023	4.1	31	18 km à l'Est de Capesterre-de-M/G	IV
16/04/2023	4.7	103	2 km à l'Est de Grand-Bourg	III
16/04/2023	5.6	18	144 km à l'Est de Saint-Barthélemy	II - IV
10/06/2023	4.0	68	< 1 km au sud-ouest de Saint-Martin,	I - III
10/07/2023**	6.9	10	277 km au nord-est de Saint-Barthélemy	III - IV
01/09/2023	5.0	53	138 km au sud-est de Capesterre-de-M/G	I - III
24/09/2023	4.1	19	17 km au sud-sud-est de Saint-François	III - V
22/10/2023	2.4	9	9 km au nord-nord-est de Deshaies	I - III
01/12/2023	5.2	13	71 km au nord-est de La Désirade	III - V
02/12/2023	6.0	24	50 km au nord de La Désirade	III - V
31/12/2023	5.1	30	88 km au nord-est de Sainte-Marie	III - V

Tableau 1. Caractéristiques des séismes régionaux ressentis en Guadeloupe, à Saint-Martin et Saint-Barthélemy en 2023 : dates et heures locales (GMT-4), magnitudes, profondeurs, zone épicentrale, intensité maximale (échelle EMS98) et lieu. (*) intensités maximales en Guadeloupe et/ou St-Martin et/ou St-Barthélemy (estimation du Bureau Central Sismologique Français à partir des données instrumentales et macrosismiques). L'intensité n'est pas quantifiée en l'absence de nombreux témoignages. (**) Séisme hors du secteur couvert (Fig. 25). Tous ces séismes ont fait l'objet de communiqués disponibles sur www.franceseisme.fr.

Pour chaque séisme ressenti, les personnes peuvent témoigner sur le site du Bureau Central Sismologique Français. Le ressenti par les personnes, couplé à la quantité et la nature des dommages observés, permettent de classer l'intensité selon une échelle dite échelle macrosismique. Pour exemple, les estimations régionales des secousses du 20 janvier 2023 et du 2 décembre 2023 sont présentées figure 26.

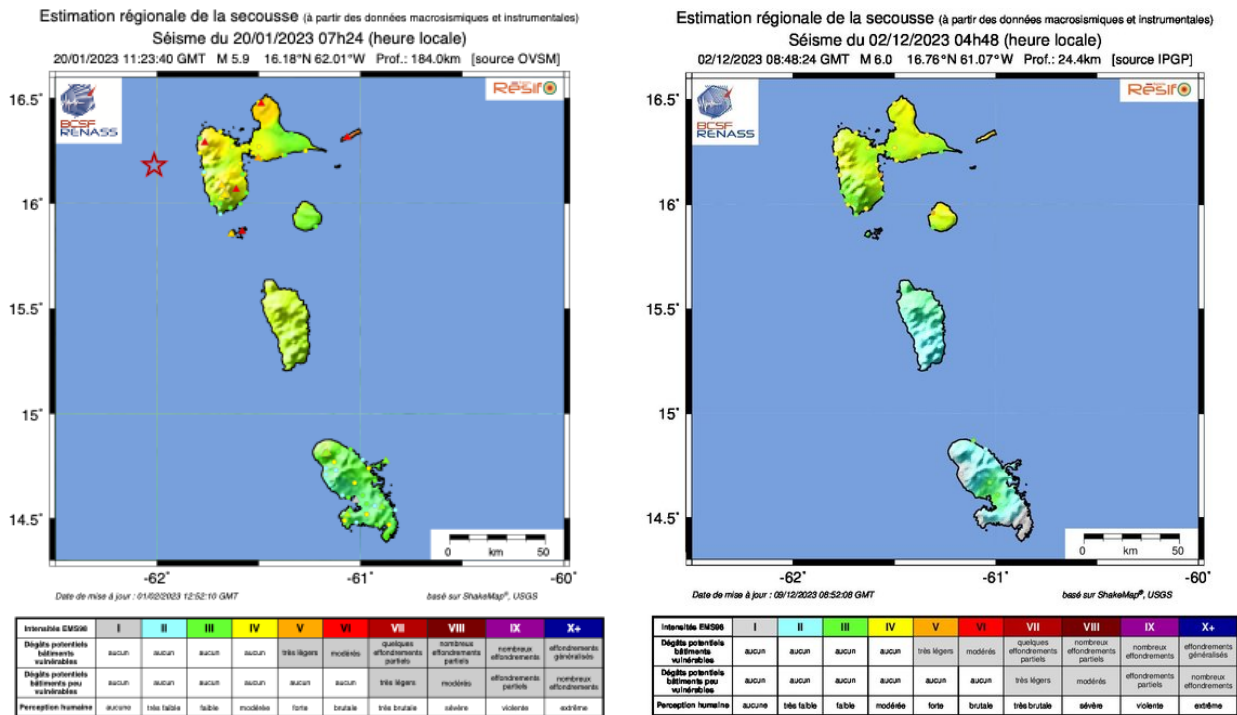


Figure 26. Estimations régionales des secousses du 20 janvier 2023 et du 2 décembre 2023 réalisées par le Bureau Central Sismologique Français à partir des données macrosismiques et instrumentales.

> Sismicité dans la zone des Saintes

La sismicité dans la région des Saintes est particulièrement surveillée depuis les séismes du 21 novembre 2004 de magnitude 6.3 et du 14 février 2005 de magnitude 5.7. Cette sismicité est produite par le jeu de failles superficielles dans la croûte caraïbe, principalement au sud de l'archipel des Saintes.

Au cours de l'année 2023, les réseaux de l'observatoire ont enregistré **722 séismes** dans la région des Saintes (Figs. 27 et 28). Ce nombre est en **forte augmentation** et se distingue de la diminution observée depuis plusieurs années (1073 séismes en 2019, 393 en 2020, 340 en 2021, 122 en 2022). Cette augmentation concerne surtout les petits séismes (répliques). Les séismes 2023 se sont produits très majoritairement à moins de 15 km de profondeur. **Trois essais sismiques** ont été identifiés :

- 29 séismes le 1 août ;
- 211 séismes entre le 30 novembre (4h00 heure locale) et le 2 décembre (11h00 heure locale) ;
- 45 séismes entre le 24 décembre (4h00 heure locale) et le 26 décembre (20h00 heure locale).

On notera que l'essai sismique majeur (30 novembre – 2 décembre) s'est produit au même moment que le séisme tectonique régional le plus important de l'année 2023 (magnitude 6.0 survenu le 2 décembre 2023 à 50 km au nord de La Désirade à 24 km de profondeur) (Fig. 28).

Le séisme le plus important, de magnitude 3.4, s'est produit le 17 mars à 11 km à l'est des Saintes (Terre-de-Haut) à 13 km de profondeur. Il n'y a pas eu de témoignage de séisme ressenti. Il faut cependant considérer que les habitants des Saintes se sont « habitués » et ne nous signalent plus systématiquement les secousses légèrement ressenties. Quelques séismes se sont produits à grande profondeur (>50 km) en relation avec la subduction de la plaque Atlantique sous la plaque Caraïbe.

Les causes de la sismicité récente aux Saintes sont encore incertaines (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. L'installation de nouveaux sismomètres (un sismomètre optique sous-marin en 2021, et un sismomètre sur Grand Îlet en 2022) contribue à mieux identifier, localiser et quantifier la sismicité aux Saintes.

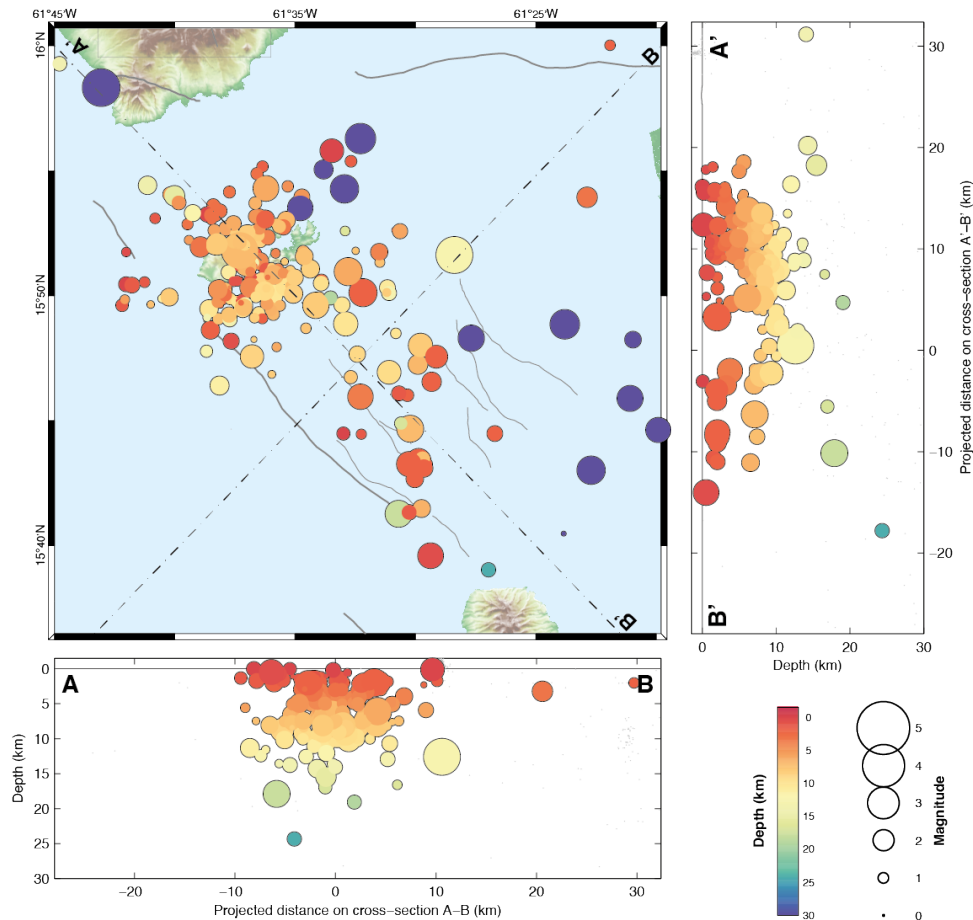


Figure 27. Hypocentres et magnitudes des séismes localisés durant l'année 2023 dans la région des Saintes. Les séismes profonds (> 25 km, bleu foncé) en relation avec la subduction de la plaque Atlantique sous la plaque Caraïbe ne sont pas visibles dans les coupes superficielles A-B et A'-B'.

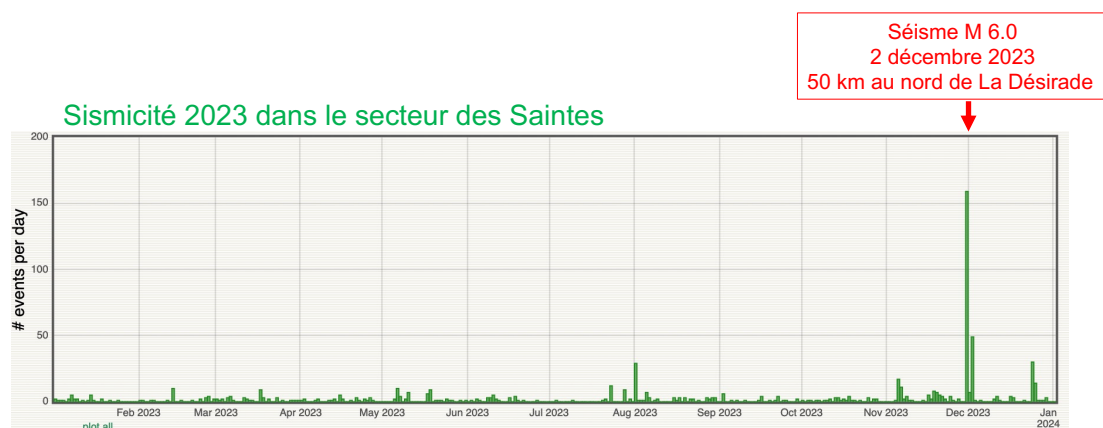


Figure 28. Sismicité 2023 dans le secteur des Saintes (nombre de séisme par jour). Notez la coïncidence entre l'essaim sismique majeur (30 novembre – 2 décembre) et le séisme tectonique régional le plus important de l'année 2023 (magnitude 6.0 survenu le 2 décembre 2023 à 50 km au nord de La Désirade à 24 km de profondeur).



4. Réseaux de mesure

Les missions de surveillance de l'observatoire se traduisent par la mesure et l'enregistrement continu de données géophysiques et géochimiques (sismologie, déformation, chimie des gaz fumeroliens et sources chaudes, météorologie) sur plus de 200 sites, sur le volcan et dans l'archipel (sur 8 îles différentes), dont une soixantaine de stations automatiques et téléométrées. Ces mesures sont complétées par des observations visuelles (photos, vidéos). Les 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 de nombreuses inconnues. 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 pour que d'autres scientifiques, maintenant ou dans plusieurs années, puissent les utiliser sans équivoque. Il s'agit d'une mission importante de tout observatoire : acquérir des données de qualité et les archiver de façon complète et exhaustive.

La mise en fiabilité, l'extension et la modernisation des réseaux de surveillance se sont poursuivies en 2023. Nous retiendrons les faits marquants pour l'année 2023 :

- Dans le cadre d'une convention avec le ministère de la transition écologique, trois paires de forages destinés à accueillir des stations multi-paramètres à bas bruit de fond, ont été finalisés sur les flancs du volcan de la Soufrière. À l'observatoire une station de test a été construite et produit des données depuis plusieurs mois pour vérifier le fonctionnement des instruments et du système d'acquisition.

Nous travaillons actuellement à l'intégration de ces nouvelles données aux systèmes d'archivage et de visualisation de l'observatoire. L'installation des instruments sur site est prévue pour mi 2024.

- Un projet financé par le MTE permet de mettre à jours nos serveurs informatique pour notamment améliorer la fiabilité du système et munir l'observatoire d'outils modernes de supervision, sauvegarde, assistance à l'écriture de scripts ou de messagerie.

- La campagne de mesure du réseau de répétition GNSS a été réalisée.

- Après plus d'un an d'interruption (Juin 2021 – Octobre 2022), l'**analyse des gaz non condensables** par spectrométrie de masse est à nouveau réalisée en routine dans les laboratoires de l'OVSG, permettant de suivre dans des délais courts la composition des gaz de la Soufrière.

Mais l'année 2023 aura aussi été marquée par la **tempête PHILIPPE et l'ouragan TAMMY** (Octobre 2023) qui ont endommagé la station sismique de Désirade (toit de la cave), inondé la cave de la station de Terre-De-Bas aux Saintes, et impacté une nouvelle fois la sortie de la source thermale Tarade en détruisant la station de mesure en place (sans compter les impacts possibles sur les autres sources qui seront évalués début 2024). Indépendamment de ces tempêtes, nous déplorons la perte de la station BERA d'Anse Bertrand, disparue lors des travaux de rénovation du hippodrome. De façon générale nous constatons le vieillissement de l'ensemble des stations VSAT qui ont été construites entre 2008 et 2012 en réponse à la mise ne place du système d'alerte aux tsunamis dans la caraïbe.

> Réseau sismologique

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. Les stations transmettent en continu (télétransmission radio, radio-modem, satellite ou réseau numérique privé) ou sur déclenchement lors de séismes (réseau accélérométrique). Les capteurs opérés par l'OVSG appartiennent à trois types de réseaux sismologiques : le réseau local « Locale Guadeloupe : GL », le réseau régional « Régional West Indies : WI » et le réseau spécifique de stations accélérométriques « Réseau Accélérométrique : RA ».



Sismométrie Locale, GL

Le réseau de mesure de la sismologie locale « GL » permet de caractériser les hypocentres des séismes d'origine tectonique (arc des Petites Antilles) ou volcanique (sous le massif de la Soufrière). Pour les séismes tectoniques proches des îles de la Guadeloupe et des îles du nord, ces localisations sont améliorées par l'utilisation des données provenant du réseau régional « WI ». Les stations sont toutes télémesurées par radio UHF/VHF, WIFI, et modem 4G. Le réseau GL comprend deux types de sismomètre :

Sismométrie courte période

Stations : 9

Interventions : Aucun site n'a évolué en cours d'année 2023.

L'obsolescence de ce réseau augmente chaque année, la maintenance de certains éléments devient difficile car la technologie utilisée par certains composants est dépassée. Depuis 2013 nous modernisons les stations de surveillance du réseau sismologique du volcan. A moyen terme nous souhaitons faire évoluer les 9 sites restants vers des stations avec acquisition numérique similaires à celles installées sur le volcan (voir plus bas sismométrie large bande volcanique). Depuis 2019, 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 et Taurus de chez Nanometrics.

Sismométrie Large-Bande

Stations : 13

Interventions : 17

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, rejoindront ce réseau. Une nouvelle station (Grand Ilet, nommée GDI) composée d'un numériseur Centaur et un sismomètre de type Trillium compact 120S (tous deux de chez Nanometrics) et d'une transmission MODEM 4G, a été installée en décembre 2022. Elle répond à la demande d'élargir la zone de détection sismique dans la région des Saintes. Cette station a été financée par le projet MTES du Ministère de la transition écologique.

Les modules de la stations Mont d'Or MOG (Taurus et Trillium compact 120S, TC120S) ont été envoyés en maintenance et sont revenus au mois de décembre. Suite à la panne du Sismomètre de Morne Amic AMC qui sera envoyé en maintenance, il a été décidé d'installer le sismomètre TC120S de retour de réparation à sa place. La station AMC est de nouveau fonctionnelle.

Suite à la panne du capteur de la station Col de L'Echelle (CDE) nous avons fait l'acquisition d'un câble de sismomètre de 20m pour l'installation d'un capteur de type trillium 40 avec une Taurus en acquisition.

Nous avons également procédé à une série de remplacement de batteries sur les stations Breislack (BLK) et Mamelles (MLL) et au remplacement du point d'accès wifi pour la station Tarade TAG.

Lors du passage de tempête Fiona en septembre 2022, la foudre a endommagé entièrement la station Carmichaël (CAG) et la station de l'Echelle ECG pour sa transmission. Nous avons pu assurer la maintenance avec du matériel de secours et permettre le bon fonctionnement de ces deux sites. Une panne sur le numériseur de la station Col de L'Echelle (CDE) et une panne du capteur de la station Mont d'or (MOG) nous ont conduit à réaliser un échange standard de module avec la station de MOG qui fonctionne pour CDE. L'ensemble des systèmes en panne ont été envoyés en réparation. Actuellement le réseau dispose de 2 stations à l'arrêt ou fonctionnant en mode dégradé.



Sismométrie Régionale (VSAT : Communication satellitaire)

Stations : 7

Interventions : 15

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 (Fig. 29). 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 l'IPGP à Paris. Elles sont utilisées par le NEIC (National Earthquake Information Center) de l'USGS (United States Geological Survey), et le PTWC (Pacific Tsunami Warning Center), centre d'alerte aux tsunamis pour le SATCAR (Système d'Alerte aux Tsunami pour la CARaïbe).

Ces stations sont conçues pour enregistrer toute la bande de fréquence 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 et 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, couplé à un logiciel de retransmission intelligent, l'ensemble permettant de compenser d'éventuelles pertes de données lors de leurs transmissions.
- 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.

Depuis avril 2023, le hub VSAT de la Martinique n'est plus opérationnel. Ainsi, les données des stations VSAT martiniquaises sont acquises dans un premier temps en Guadeloupe avant d'être acheminé à l'OVSM. Ce fonctionnement demande une étroite collaboration entre les deux observatoires. Par ailleurs, il rend l'OVSM dépendant de la connectivité réseau en Guadeloupe. Au cours de l'année 2023, plusieurs défaillances du réseau Guadeloupéen ont également pénalisé l'observatoire de la Martinique.

Du fait de l'éloignement géographique entre les différentes stations, la maintenance des stations VSAT demande une logistique importante. Même si une bonne partie de la maintenance peut être faite à distance, des interventions sur le terrain sont parfois nécessaires.

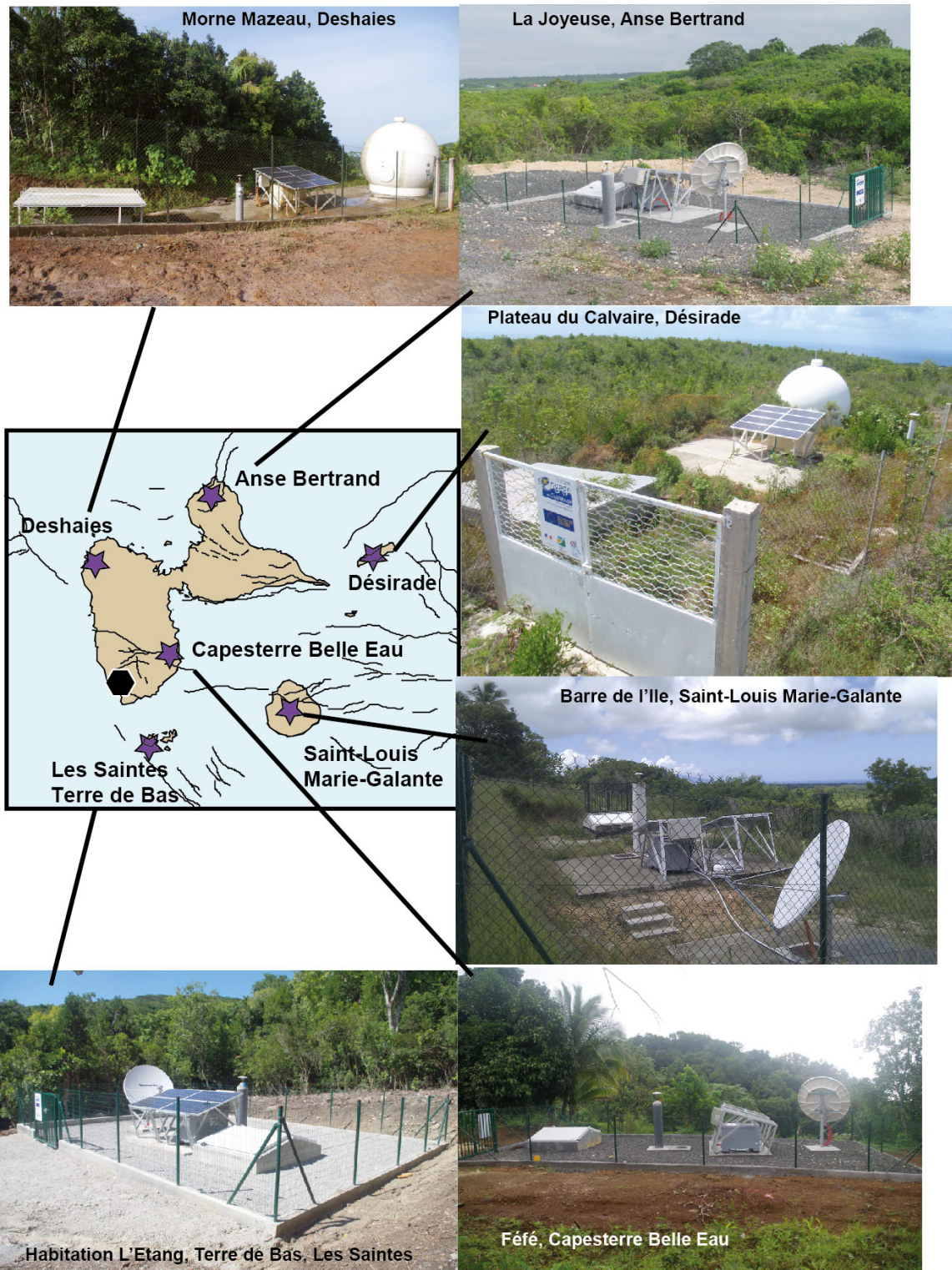


Figure 29 : Les 6 stations sismologiques et géodésiques du réseau régional installées sur l'archipel guadeloupéen



Au cours de l'année 2023, plusieurs stations ont fait l'objet d'interventions particulièrement marquantes :

- En octobre, la cave de la station de Terre-De-Bas a été inondé après le passage de la tempête Philippe. Le coffret contenant le matériel d'acquisition et de transmission a été immergé. L'émetteur-récepteur (Cygnus) est alors tombé en panne. Au cours de deux interventions, le Cygnus a été changé et le coffret contenant l'électronique a été déplacé à l'extérieur de la cave.
- En décembre, l'île de la Désirade a été très fortement touchée par le passage de l'ouragan Tammy. Le vent a arraché le système de fermeture de la trappe, puis celle-ci s'est empalée dans la clôture de la station. Une intervention nous a permis de reconstruire temporairement le système de fermeture de la trappe.
- En Juin, l'émetteur-récepteur (Cygnus) de la station Désirade est subitement tombé en panne, il n'a pas pu être réparé par le fabricant. Le BUC (système pour la transmission montante) de la station de Saint-Barthélemy est lui aussi devenu hors d'usage. Dans les deux cas, le remplacement du matériel a résolu le problème.

En 2023, soit 15 ans après l'installation de la première station à Deshaies, le réseau VSAT se montre vieillissant : les clôtures de nombreuses stations sont endommagées (station à Saint-Barthélemy et à La Désirade), de nombreuses pièces mécaniques des paraboles sont rouillées (antenne OVSG fragilisée), le matériel électronique/électrique se détériore (Cygnus, analyseur de spectre, batteries, panneaux solaires). Pour faire face à cette situation, il conviendrait de renouveler le parc à l'aide de nouveaux éléments.

Accélérométrie permanente (réseau RAP)

Stations : 18

Interventions : 20

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 de Centre de Données Sismologiques des Petites Antilles, CDSA (BRGM, IPGP, UAG), 8 nouvelles stations ont été financées pour compléter la répartition spatiale du réseau accélérométrique. Le réseau accélérométrique compte 19 stations qui émettent leurs données, à la demande des systèmes d'acquisition installés 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 modems sur des lignes téléphoniques pour 6 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). Des évolutions techniques majeures de ce réseau sont prévisibles dans les années à venir.

Actuellement, les 13 stations (Le Houëlmont (CDSA), Terre-de-Haut (THMA), Marie-Galante (GBGA), Saint-Martin (SMHA), Saint-Barthélemy (SBTA), Basse Terre (PBTA), Désirade (ADEA), Baillif (ABFA), Capesterre-Belle-Eau (CBEA), Terre de Bas (TBDA), Pointe-à-Pitre (IPTA), le moule (MORA), Terre de Bas (TBPA)) disposent de systèmes d'acquisition modernes permettant une acquisition continue 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 de l'aérodrome de Baillif (ABFA).



L'année 2023 a été marquée par :

- la signature de la convention d'installation d'une station au sein de la nouvelle école de pigeon à Bouillante avec la Mairie de la ville,
- la perte de la station BERA d'Anse Bertrand, disparue lors des travaux de rénovation du l'hippodrome,
- l'installation de la station MORA sur le site du radar de Météo France au Moule,
- la maintenance des stations ABFA et THMA, ainsi que le remplacement du capteur de TBPA pour améliorer la transmission. Des maintenances de préventions ont également été réalisées sur les autres sites.

Une campagne de caractérisation des conditions de sites aux 7 stations accélérométriques du réseau RAP-RESIF en Guadeloupe, a été opérée en 2023 par le Réseau Accélérométrique Permanent français (RAP), avec le soutien du Ministère de la Transition Ecologique et Solidaire.

L'organisation des opérations et les mesures ont été confiées à un groupe de travail du RAP, ayant l'expérience de ce type de campagne dans l'hexagone. La caractérisation géophysique des stations accélérométriques est indispensable à la bonne utilisation des données de mouvement sismique qui y sont enregistrées. Cette caractérisation consiste en la détermination de paramètres qualifiant la rigidité des terrains sur lesquels les stations sont implantées : profils complets de vitesse de propagation des ondes de cisaillement, classe de sol réglementaire EC8, paramètre VS30.

Les méthodes de prospection utilisées sont non destructives, le sol n'est pas foré et ces opérations ne laissent pas de trace. Elles sont basées sur l'analyse des propriétés de dispersion des ondes de surface. La méthodologie mise en œuvre et les traitements associés correspondent aux standards les plus modernes, et s'inscrivent dans la dynamique internationale actuelle de caractérisation systématique des stations accélérométriques. Les informations obtenues permettent de mieux calibrer le choix des modèles de prédiction du mouvement sismique qui sont utilisés dans les évaluations de l'aléa sismique.

Les 7 stations choisies pour bénéficier de cette campagne 2023 sont parmi celles qui ont enregistré à ce jour le plus grand nombre de mouvements sismiques générés par des tremblements de terre. D'autres critères importants sont l'apport stratégique du site dans l'estimation de l'aléa sismique et la faisabilité du déploiement des instruments de mesure pour la caractérisation.

Pour la bonne réalisation les intervenants provenaient de différents instituts partenaires du réseau RAP-RESIF : l'ISTerre de Grenoble, le CEA, le BRGM, l'OMP de Toulouse, l'EOST de Strasbourg, le CEREMA de Nice, et l'Observatoire Volcanologique et Sismologique de Guadeloupe (OVSG).

Le plan d'acquisition à chaque station comprenait des mesures AVA (Ambient Vibration Arrays – mesures passives des ondes de surface sur bruit ambiant). Des stations sismologiques temporaires étaient déployées toute une journée autour de chaque station permanente sur un rayon de 500 m. Le protocole impliquait aussi des mesures MASW (Multi-Analysis Surface-Wave).

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 François 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, chaque seconde du sismographe numérique étant 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.



En avril 2023 le code PHASEWORM a été mise en place sur les serveurs de l'OVSG pour la détection, classification, et localisation automatique des séismes par machine learning (J.-M. Saurel et Lise Retailleau)

> Réseau géodésie et extensométrie

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 requière 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...).

Les déformations et mouvements en profondeur sont suivies par la gravimétrie (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 (g) en un point donné et la gravimétrie relative, beaucoup plus facile à mettre en œuvre, qui permet de mesurer uniquement les variations du champ de pesanteur.

GNSS (Global Navigation Satellite System) permanents

Stations permanentes : 30

Interventions : 27 en 2023 pour maintenance

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 (Fig. 30 et 31).



Figure 30. Carte du réseau de GNSS continus dédié à la surveillance du volcan : En bleu l'existant et en rouge les sites à équiper de GNSS continus en 2024 dans le cadre du projet « forages » financé par le MTE .

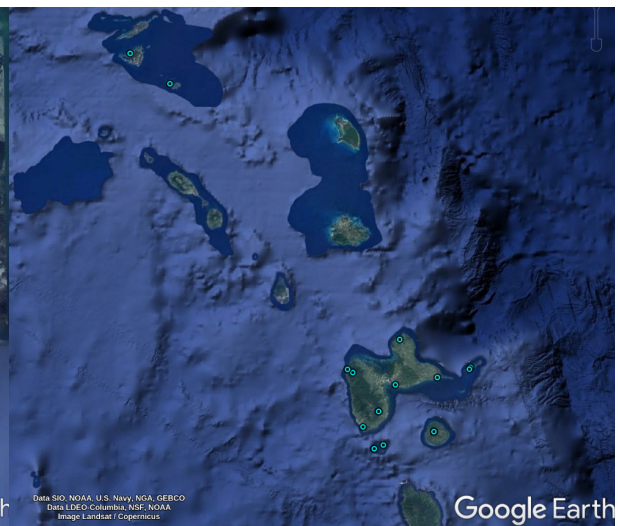


Figure 31. Carte du réseau de GNSS continus dédié à la surveillance des déformations régionales.



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 (Fig. 32).

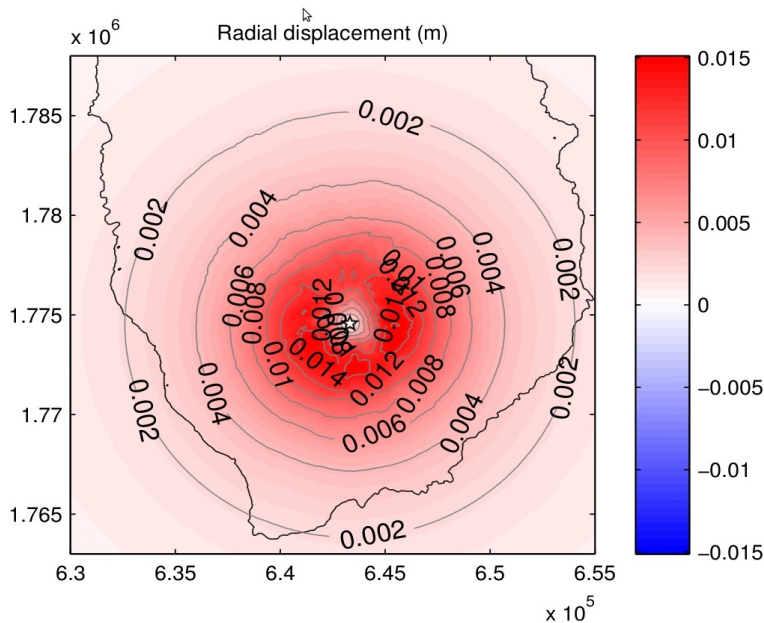


Figure 32. Déformation radiale attendue suite à l'intrusion de $1 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ à une profondeur de 3 km sous le dôme de la Soufrière. Le volume du dôme de la soufrière tel qu'il apparaît actuellement est d'environ $100 \cdot 10^6 \text{ m}^3$.

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 d'estimer les volumes et les profondeurs d'intrusion.

Aucun nouveau site a été installé en 2024. En plus des stations de mesures décrites plus haut, les trois forages instrumentés réalisés dans le cadre d'une convention avec le ministère de la transition écologique (voir plus bas : projet de forages instrumentés) seront équipés d'un GNSS continu. Le site de Parnasse étant déjà équipé, deux sites de mesure vont être rajoutés en 2024 : Savane à Mulets et Savane l'Étang.

GNSS (Global Navigation Satellite System) de répétition

Sites : 57

Interventions : 74 interventions sur 37 sites différents

La campagne de mesures a porté sur le réseau de répétition autour du volcan. La partie dédiée aux déformations régionales, sur laquelle un signal moins important, est attendu n'a pas été mesurée cette année. Les résultats obtenus mettent en évidence des mouvements plus importants sur le dôme et la nécessité de réitérer ces mesures tous les ans (voir bilan activité).



Gravimétrie

La gravimétrie est la mesure de la valeur de l'accélération de la pesanteur (gravimétrie absolue) ou de ses variations spatiales ou temporelles (gravimétrie relative). En 2022 en collaboration avec nos collègues de l'IPGP dans le cadre du projet ANR MEGaMu nous avons préparé un instrument spécialement dédié à la mesure des variations temporelles de pesanteur qui sera installé sur le dôme de la Soufrière dans la zone fumerolienne à l'aplomb de la zone où sont attendus les plus importants transferts de masse. La mission d'installation de cet appareil, prévue pour le mois de mars 2023, n'a pas pu être réalisée comme prévu car le gravimètre relatif envisagé pour cette installation au sommet du dôme a été sévèrement endommagé lors des tests préalables à la mission réalisés en métropole. La mission a cependant été maintenue permettant la première mesure sur le terrain d'un gravimètre AQG-B01 (gravimètre absolu quantique).

Extensométrie / fissurométrie

Sites : 14 sites d'extensométrie et un site de fissurométrie
Mesures : 7 campagnes de mesure en 2023

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 DGS1 (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 la mesure 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 répétées manuellement environ toutes les six semaines, lorsque les conditions météorologiques sont favorables. En juillet 2022 nous avons constaté la chute d'un bloc rocheux qui s'est décroché du surplomb juste au-dessus des appareils de mesure du site de fissurométrie situé en haut de la faille du 30 août. Le bloc qui a roulé en contrebas a une dimension estimée à environ 1/2 m³. Durant cet effondrement un caillou a percuté l'ancien fissuromètre et l'a tordu, l'endroit est à présent jugé trop dangereux pour continuer à y réaliser des mesures (Fig. 33).

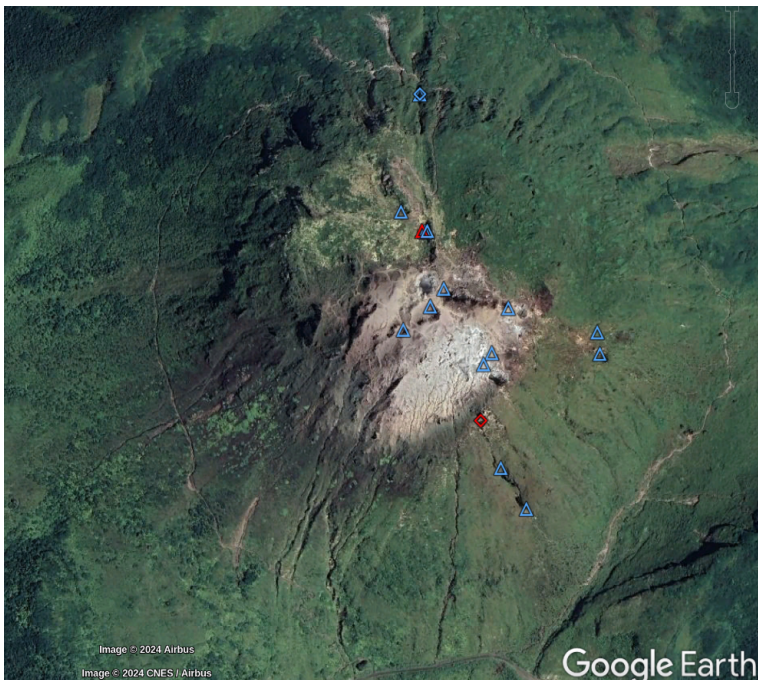


Figure 33. Réseau de mesure d'extensométrie (triangles) et de fissurométrie (losanges). En rouge le site endommagé en 2022 et 2023.



Marégraphes

Sites : 2

Interventions : 1 à Deshaies pour maintenance.

Au cours des années 2000, les craintes suscitées par une éventuelle déstabilisation de la Soufrière de Montserrat, et la possibilité de formation d'un tsunami sur les côtes 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 réinstallé deux marégraphes à La Désirade (2010) et à Deshaies (2012). L'installation de ces deux marégraphes s'inscrit dans une dynamique régionale (Fig. 34) 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. 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 2022 en collaboration avec des équipes 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>

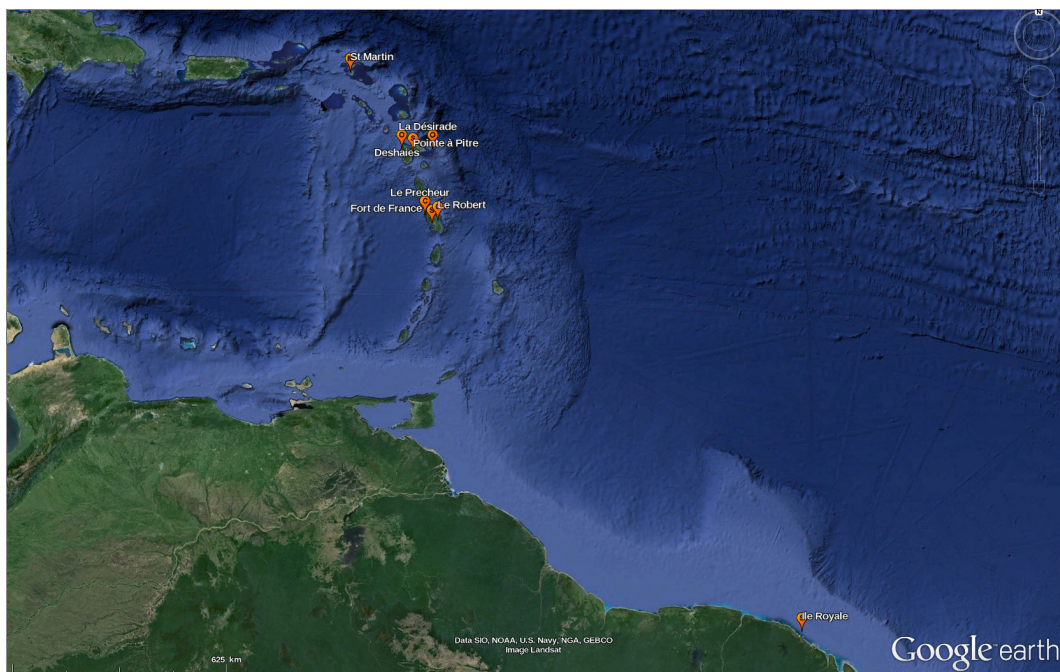


Figure 34. Le réseau français de marégraphes participant à l'alerte aux tsunamis dans les caraïbes.



> Réseau géochimique

Fumeroles

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 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 (1) le prélèvement de gaz, eaux, et solides (roches altérées, minéraux fumeroliens) suivi de différentes analyses en laboratoire permettant le dosage des différentes espèces chimiques et (2) des mesures réalisées directement sur place (analyseur MULTIGAZ portable)

Onze sites fumeroliens sont l'objet d'une surveillance (Tableau 2), incluant la fumerolle pilote Napoléon Nord active depuis 2014 et le gouffre Tarissan dont le lac acide est régulièrement échantillonné. A cela s'ajoute des mesures dynamiques réalisées en traversant le panache sur plusieurs axes. La fumerolle principale au sommet de la Soufrière (Cratère Sud) n'est plus échantillonnée depuis l'arrêt en 2021 de la seule bouche approchable dans des conditions de sureté minimum (Cratère Sud Centre). Le panache de gaz du Cratère Sud reste toutefois régulièrement analysé par multigaz. Chaque sortie nécessite la présence d'au minimum 2 personnes (3 à 4 personnes pour les sorties avec prélèvement pour les bouteilles de Giggenbach et condensats).

Les principaux types de prélèvements et mesures directes réalisés en 2023 sont :

- Gaz Total (Giggenbach)

Les gaz sont collectés à l'aide d'ampoules en verre, contenant de la soude, et préalablement mis en dépression (technique de Giggenbach). Le bullage des gaz dans la soude, permet de piéger les espèces chimiques condensables (H_2O , SO_2 , HCl notamment), les espèces non condensables (He , Ar , CH_4 , N_2 , H_2S , CO_2 , O_2) restant dans le vide supérieur de l'ampoule. La phase condensée dans la soude et le gaz sont analysés respectivement par chromatographie ionique et spectromètre de masse à source gazeuse (voir ci-dessous). La combinaison de ces deux mesures indépendantes permet de reconstituer la composition de la phase gazeuse totale.

- Condensats à l'évent

Des condensats sont collectés par refroidissement rapide du gaz. En 2021, un système de condensation actif (refroidit par une circulation d'eau) a été mis en place, permettant une condensation plus efficace du gaz, et la récupération de la phase non condensable (« gaz sec ») dans une ampoule séparée. Un système de maintien en température des gaz a également été développé dans le but de déporter le prélèvement des fumerolles et d'améliorer significativement les conditions de travail. Ce système, initialement développé pour le site CSC n'est plus utilisé sur le site NAPN qui peut être approché sans danger.

- Condensats dans le panache

Les condensats sont collectés dans des saladiers en verre, placés préalablement dans un bain d'eau froide. Ce type de condensation est le plus proche du phénomène naturel.

- Prélèvement du lac acide Tarrisan

Le lac dont la surface se trouve entre 80 et 100 m de profondeur est échantillonné à l'aide d'un flacon en polyéthylène, suspendu à un filin synthétique, et descendu à l'aide d'un système de poulies. Le dispositif, remis en service en 2022, a permis de réaliser des prélèvements mensuels durant l'année 2023



Tableau 2 : principaux types de prélèvements et mesures directes réalisés en 2023 sur les sites fumeroliens

Site	Type	Type prélèvement / mesure				
		Gaz à l'évent	Condensats A l'évent	Gaz panache (Mutigaz)		Condensats panache passif « saladiers »
		Prélèvement	Prélèvement	Mesure directe ponctuelle	Mesure directe flux (traversée panache)	Prélèvement
Napoléon Nord (NAPN)	Fumerolles	• Giggenbach • N=15	• Direct • Condenseur refroidi (ELSA) • N=13	• N=9	-	• N=4
Napoléon Est NAPE1	Fumerolles	-	-	• N=9	-	-
Napoléon Est NAPE2	Fumerolles	-	-	• N=9	-	-
Napoléon Est NAPE3	Fumerolles	-	-	• N=9	-	-
Cratère Sud Nord (CSN)	Fumerolles	-	-	• N=9	• N=6	• N=4
Cratère Sud Sud (CSS)	Fumerolles	-	-	• N=9	-	• N=2
Gouffre 56	Gouffre avec fumerolles	-	-	• N=7	• N=6	• N=1
Gouffre Tarissan	Gouffre avec fumerolles et lac acide	-	• N=9 (Prélèvement du lac acide)	• N=9	• N=6	• N=4
Gouffre Dupuy	Gouffre avec fumerolles	-	-	• N=1	-	-
Gouffre Hammouya	Gouffre avec fumerolles	-	-	• N=3	-	-
Faille de la Ty	Fumerolles	-	-	• N=9	-	-
Chemin des dames		-	-	-	• N=1	-

N : nombre de prélèvements/mesures réalisés en 2023



- Mesures directes dans le panache (MultiGAS)

En parallèle à ces différents prélèvements, les gaz sont analysés sur place à l'aide d'un analyseur portable « MultiGAS ». Cet instrument, disponible à l'OVSG depuis 2016, 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 fumeroliens 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. Par exemple, en plus des sites actifs régulièrement suivis, 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, dans la zone de Napoléon). En plus des mesures de compositions, des mesures de flux sont effectuées au niveau des événements les plus importants qui génèrent des panaches bien formés. En 2023, dix-huit 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. Le MultiGAS permanent mis en place à Gouffre 56 a été désinstallé en milieu d'année 2023, en raison de nombreuses pannes liées aux conditions climatiques et aux vapeurs acides.

Concernant les données, nous avons amélioré le traitement des données MultiGAS en prenant en compte les réponses des capteurs (Moune et al., 2022) et avons développé fin 2023 une routine informatique pour traiter ces données en temps réel (F. Beauducel). Ce développement permet de visualiser sur Webobs (logiciel de traitement et visualisation des données) les variations des concentrations des diverses espèces chimiques, des paramètres physico-chimiques (p.e. Rh, T, P) ainsi que des rapports de concentrations $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{S}$ et $\text{SO}_2/\text{H}_2\text{S}$ qui sont cruciaux pour suivre l'activité volcanique.

Sources chaudes

Le massif volcanique de la Soufrière constitue un relief donnant naissance à des précipitations abondantes (entre 4 et 7 mètres de pluies chaque année). 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 (Fig. 35).

En 2023, quinze sites ont été échantillonnés au cours de dix sorties (chaque sortie nécessitant 2 personnes). Huit sites ont été équipés pour la mesure en continu de la température, une station pour la mesure en continu de la conductivité. Les sondes de température utilisées sont des Seabird SBE56 (source RM3) et Tinytag Aquatic2 (sources TA, BJ Supérieur, GAB, GA, RM3, RM2, RGO1 et RGO2). Des mesures de débit manuelles sont faites à la source Galion afin de les comparer aux mesures automatiques.



L'accompagnement par la société Vert Intense mis en place en 2022, afin de réaliser la sortie à Ravine Goyavier, a été poursuivi. Cette sortie se fait à l'aide d'équipements de type harnais et cordes. Suite à l'ouragan Tammy (octobre 2023) un éboulement a endommagé la sortie de la source TA et a détruit la station de mesure en place. Un contrôle des autres sites est prévu début 2024.

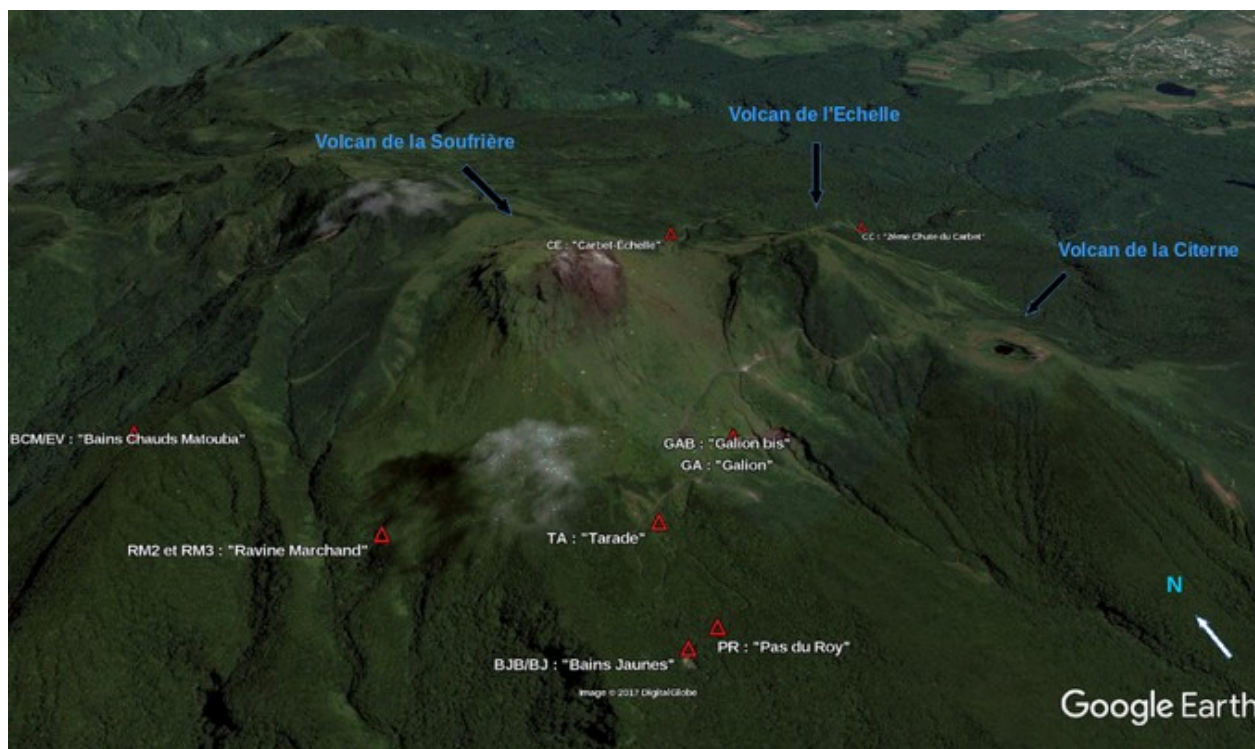


Figure 35. Localisation des principales sources hydrothermales suivies par l'OVSG – IPGP en 2023 – Image Google Earth

> Réseau thermique et flux de CO₂

La température et le flux de chaleur sont des observables primordiaux pour un volcan. Ceci est d'autant plus vrai pour 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. Le bilan thermique domine de loin le bilan énergétique d'un tel volcan. Face à cette évidence, un réseau de surveillance thermique est en cours d'installation et amélioration depuis fin 2017. Ce réseau combine des mesures en continue à haute fréquence dans les fumerolles, des mesures ponctuelles de température par sonde ou caméra thermique, ainsi que des mesures du flux de CO₂ par un système de cloche embarquant un capteur. La mesure du flux de CO₂ permet notamment d'évaluer la quantité de chaleur émise par condensation de la vapeur d'eau dans le sol, en faisant l'hypothèse, entre autres, que les gaz condensant dans le sol ont le même rapport CO₂/H₂O que les 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. Malgré le départ de D. Jessop vers l'OPGC-LMV en 2021, les activités de surveillance thermique ont continué en 2022 et 2023 via des missions ponctuelles des intervenants (voir collaborations). Dans le contexte d'extension de l'activité vers le nord-est, et l'augmentation de température de la fumerolle NapN fin 2022, une sonde de température permanente (sonde PT100 4 fils gainée téflon) et télémétrée en temps réel a été installée en février 2023 à proximité immédiate de la fumerolle NapN. Nous nous sommes équipés d'une nouvelle caméra IR compacte (HIK micro M11) opérable sur une large plage de température (-20 à + 550°C) en complément du modèle FLIR toujours opérationnel. Nous avons également renouvelé les capteurs du système de cloche utilisé pour la mesure du flux de CO₂ dans le sol.



> Réseau météorologique

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 sommet (Piton Sanner)

Stations : 1

Interventions : 8

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 télémetrée 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. La station comporte également un collecteur d'eau de pluie, pour analyse (collaboration avec l'ObsERA). Une jouvence de la station météo a été réalisée en 2016 (transmission wifi et format standard d'échange de données « Miniseed »). En 2023, la batterie a été remplacée par une neuve en raison de problèmes d'alimentation en énergie. Cette opération a bénéficié de l'assistance de l'hélicoptère de la Sécurité Civile de Guadeloupe pour les transports des batteries.

Pluviométrie Soufrière (Savane à mulet)

Stations : 1 ;

Interventions : 4

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 hydrothermal 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 d'un point toutes 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. Jusqu'à fin 2021 ces données ont été intégrées dans les routines graphiques automatiques de l'observatoire, permettant d'avoir une vue d'ensemble des apports en eaux météoriques sur le massif. En 2023, l'ObsERA a établi une convention avec Météo France pour renouveler ce partage de données.



> Projet de forages instrumentés

Un projet de trois stations multi-paramètres en forages a été initié dans le cadre d'une convention avec le ministère de la transition écologique. Chacune de ces stations comprend deux forages (10m et 50m) qui débouchent sur une dalle en béton armé supportant d'autres équipements. Le but de cette instrumentation est d'observer les micro-séismes générés par l'activité hydrothermale sous le dôme de la Soufrière, les variations de la nappe phréatique et les déformations liées à la réactivation du volcan. Les trois sites (Parnasse, Carbet, et Savane à Mulet) ont été réceptionnés entre le 09/09/2022 et le 24/01/2023. Ces forages accueilleront en 2023 des stations multi-paramètres à bas bruit de fond, incluant : un sismomètre large bande, deux inclinomètres dont un de très haute sensibilité, un capteur de pression, des capteurs de températures, un capteur de conductivité, une station GNSS et une station météo. La station GNSS et la station météorologique seront naturellement placées en surface et le reste des instruments seront répartis dans les deux forages : le forage de 10 m de profondeur accueillera le sismomètre tandis que les inclinomètres, sondes de températures et la sonde de pression seront placés au fond d'un puits de 50m de profondeur. Les coffrets d'intégration comprenant les modules d'acquisition des données, de protection contre la foudre et de communication ont été conçus puis réalisés en 2023 à l'OVSG (Fig. 36). Début 2024, l'observatoire procède (1) au test d'une station complète dans ses locaux, et (2) à l'intégration des données issues de ces nouvelles stations aux systèmes d'acquisition et d'archivage. La mécanique d'intégration des instruments développée à l'IPGP a été livrée fin 2023 (Fig. 37). L'installation des instruments en fond de puits est prévue pour mi-2024.

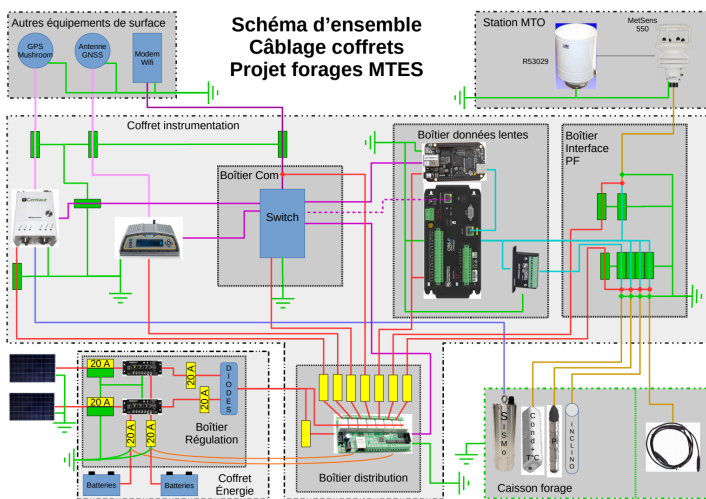


Figure 36 (haut) : Schéma présentant le câblage des coffrets en surface et des capteurs situés en surface ou en fond de puits.

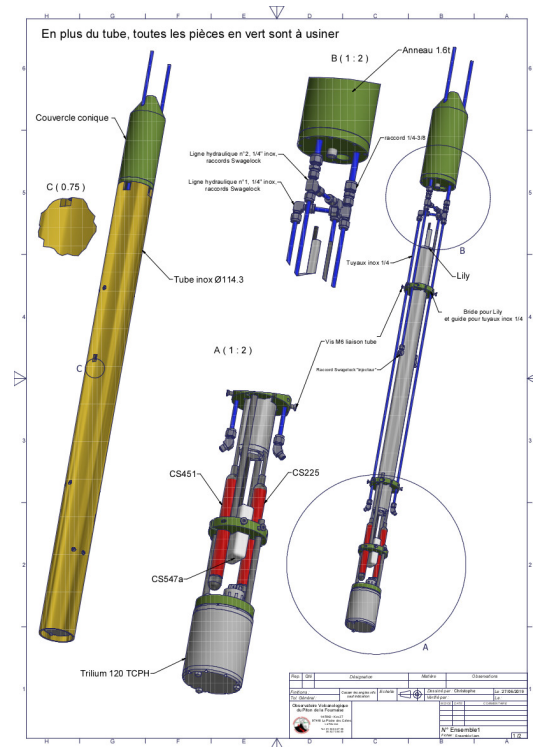


Figure 37 (droite) : Schéma d'ensemble du système mécanique d'intégration des différents capteurs développés à l'IPGP



5. Acquisition, traitement, visualisation, archivage et partage des données

> Acquisition, traitements et archivages des données sismologiques

Nous disposons d'une chaîne de traitement sismologique basée sur des flux de données SEED (Standard for the Exchange of Earthquake Data).

Acquisitions :

- Acquisitions réseau sismologique analogique

Les données des 9 stations courtes-périodes à transmission radio analogique sont numérisées par deux Centaur de chez Nanometrics. La transmission des données se fait au format Miniseed vers le serveur Earthworm de collecte qui les renomme avant leur transfert au serveur de données temps réel SeisComp de l'OVSG

- Acquisitions réseau sismologique numérique SeedLink

Les données des stations numériques large bande disposant de connexions réseau IP standard (locales ou distantes) sont acquises à l'aide de système type Taurus ou Centaur de chez Nanometrics. La transmission des données se fait directement au format Miniseed entre leur serveur SeedLink intégré et le serveur de données temps réel SeisComp de l'OVSG

- Acquisition numérique Nanometrics

Ce système est un logiciel d'acquisition lié 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 le logiciel Nanometrics NAQS. Cette acquisition reçoit les données du réseau régional par satellite (VSAT), et d'une partie des stations numériques du réseau de surveillance de la Soufrière et des stations RAP continues qui ne transmettent pas en SeedLink.

- Acquisition réseau accélérométrique

Les données accélérométriques du RAP sont rapatriées par modem 4G, ou ADSL ou wifi. Le matériel piloté par déclenchement d'événements est devenu obsolète et n'a pas été maintenu. Les stations sont actuellement équipées de numériseurs qui assurent la transmission et l'enregistrement continu des données en temps réel. La transmission des données se fait directement au format Miniseed entre leur serveur SeedLink intégré et le serveur de données temps réel SeisComp de l'OVSG.

Traitements :

- Serveur de données temps réel SeisComp :

Au début 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. Pour des raisons d'incompatibilité, certains flux transitent d'abord par un serveur de collecte Earthworm. Ce flux est ensuite dirigé vers 3 clients : (1) 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 mondial, réseaux partenaire,...). Ce flux est également archivé temporairement par sécurité. (2) Le serveur de données continu (voir ci-dessous). (3) 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 e-mail. 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.

> 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 les portails web VOLOBSIS M3G, ils 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.

Alerte aux déformations par GNSS

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 mesurées par les réseaux de GNSS permanents dédiés à la surveillance de la Soufrière. 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.



Le développement de cette solution a été effectué par un 3ème informaticien (Robin Dumeige) présent en CDD à l'OVSG d'août 2019 à octobre 2020, mais n'a pas pu être finalisé et mis en production, faute de personnel (1 seul informaticien depuis février 2021).

Cette solution décrite plus haut doit encore être adaptée 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 déstabilisations de flanc.

Nous envisageons également 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.

> 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. En 2023, les opérations suivantes ont été réalisées pour maintenir les capacités opérationnelles des laboratoires de chimie :

Chromatographie ionique (système Aquion de chez Thermo Scientific)

Cet équipement installé début 2019 permet d'analyser, après une dilution adéquate, les cations (Mg^{2+} , Ca^{2+} , Na^+ , K^+) et anions (Cl^- , F^- , Br^- , NO_3^- , SO_4^{2-}) majeurs dans les différents types de condensats de gaz (direct, par refroidissement actif, piège NaOH), les eaux acides du lac acide Tarissan et les sources thermales. Suite à une perte de sensibilité due au vieillissement du matériel lié à une utilisation fréquente, nous avons installé une nouvelle colonne, une pré-colonne et un suppresseur en avril 2023. En milieu d'année, nous avons rencontré un problème avec la présence d'une fuite au niveau de la pompe, qui semblerait être due à l'usure d'un joint. Une solution ponctuelle a pu être trouvée, suite à la visite annuelle d'un commercial de chez Thermoscientific en novembre. En 2024, nous allons mettre en place une maintenance, tous les deux ans, par un technicien de chez Thermoscientific, qui effectuera le déplacement de manière mutualisée avec d'autres laboratoires en Guadeloupe. Durant l'ensemble de l'année 2023, nous avons connu de longues périodes de ralentissement, voire d'arrêt du fonctionnement du laboratoire, à cause des problèmes d'approvisionnement en eau courante.

Spectromètre de masse à source gazeuse (Pfeiffer Vacuum OmniStar)

Ce spectromètre installé en 2016 est utilisé pour analyser les gaz non-condensables (He, Ar, CH_4 , N_2 , H_2S , CO_2 , O_2), qui se concentrent au-dessus de la soude dans les ampoules de Giggenbach. Suite aux formations à la maintenance, la calibration et la mesure en 2022, les analyses ont pu être relancées et sont réalisées de manière régulière au sein de l'OVSG. Le spectromètre n'a pas connu de panne en 2023. Seules les batteries de l'onduleur régulant l'alimentation électrique ont été changées.

> 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 (Fig. 38) 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 d'un logiciel ou service, par exemple :

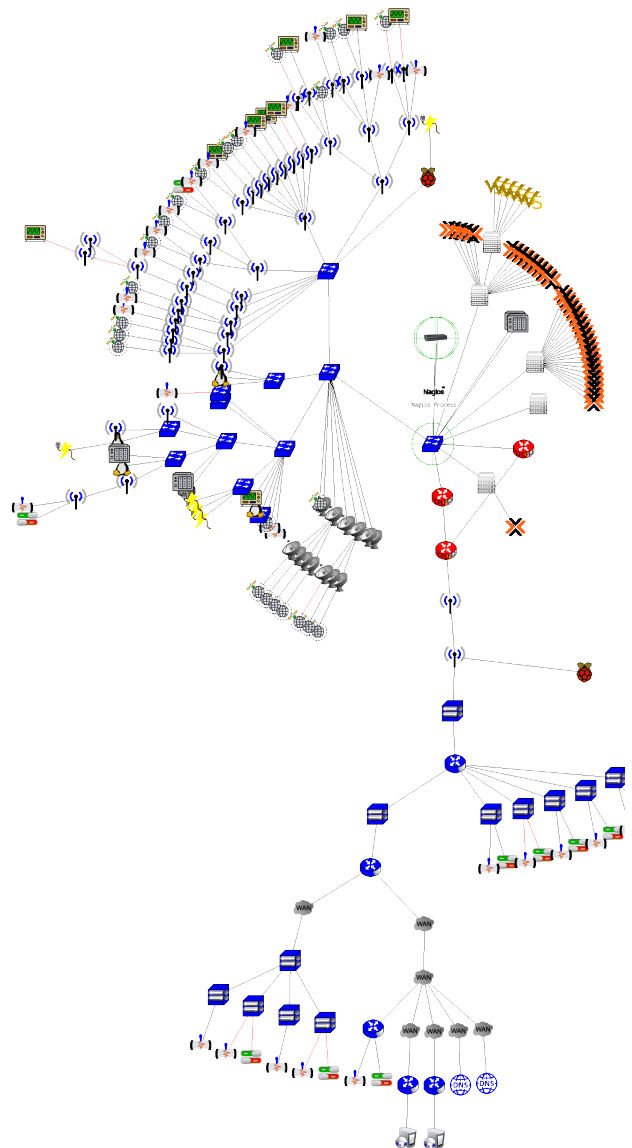
- l'état et la qualité d'une transmission (Ubiquiti AirMax, WiMax, VSAT, Internet, etc.) ;
- le fonctionnement de systèmes d'exploitation ou de logiciels, notamment les logiciels d'acquisition tels que les outils Nanometrics, EarthWorm, SeisComp, au ceux développés par l'OVSG ;
- la production ou conversion 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 1979 services sur 264 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.).

En 2023, le serveur Nagios a été réinstallé en version logicielle plus récente pour faire face à plusieurs obsolescences et ses configurations entièrement revues en profondeur, pour les actualiser et simplifier leur maintenance. Un certain nombre de greffons maison ont été retouchés par la même occasion.

Figure 38. Reproduction d'une carte des réseaux informatiques générée par Nagios, faisant apparaître les équipements supervisés.



> 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.

Le matériel professionnel permet de viser 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.

En 2023, les anciennes baies de stockage et leur réseau de stockage (SAN Fibre Channel) ont été arrêtés pour cause d'obsolescence et donc manque de fiabilité potentielle. De plus, notre plus gros et plus récent serveur de stockage (NAS), est tombé en panne il y a plus de 2 ans et nous espérons son retour prochain de SAV. En attendant de nouveaux matériels, une infrastructure de transition a été mise en place, en mutualisant par virtualisation un serveur de calcul sous-utilisé, en transférant le stockage (précédemment en SAN FC) vers d'une part ce serveur, d'autre part 2 NAS d'entrée de gamme, tous trois exportant leurs volumes par iSCSI (technologie SAN plus souple). C'est un compromis privilégiant l'intégrité des données à leur disponibilité et réservant les performances d'accès aux données qui en ont besoin. Ces lourds changements d'infrastructure se sont faits sans interruption de service, après une minutieuse préparation par l'informaticien (AB).

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 qui alimentera alors tous les réseaux électriques de l'observatoire.

En 2023, le remplacement des batteries a été planifié puis réalisé sur un seul des onduleurs. Entre temps, un boîtier externe de batteries a été victime d'un dysfonctionnement ressemblant à un départ d'incendie. Fort heureusement c'était en heures de bureau et l'intervention rapide du personnel a évité le pire. Car ces équipements fonctionnent en continu, donc majoritairement en heures non ouvrées, et nous ne disposons pas de système de sécurité incendie. De plus, le remplacement des batteries du second onduleur est reporté sine die, en raison d'une part d'une anomalie de câblage et d'autre part du fonctionnement de nos systèmes sur une infrastructure de transition qui ne tolère plus les coupures électriques.

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 rocades de fibres optiques.

Au niveau logique, le réseau informatique est divisé en parties isolées et les accès filtrés pour la sécurité des accès et des données. L'ouverture restreinte du réseau de l'observatoire vers l'internet permet notamment un partage des données en temps réel avec les collègues de l'IPGP ou internationaux, ainsi que le télétravail des membres de l'OVSG.

Cette architecture 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 ».

Le remplacement de notre parc matériel vieillissant de serveurs, stockage et réseau est en cours, la commande ayant été passée. La mise en service de ces matériels nécessitera un travail supplémentaire.

De 2008 à 2019, l'observatoire a disposé de deux informaticiens (hors périodes de quelques mois de vacance de poste). En 2019-2020, trois informaticiens, mais depuis 2021, un seul et aucun recrutement n'est envisagé. Ses tâches sont très nombreuses et diverses, dans tous les domaines de l'informatique et il est impliqué par ailleurs dans le reste des activités de l'observatoire hors informatique. Il en découle des évolutions très lentes de certaines tâches, malgré leur importance. En complément des achats matériels en cours, un budget a donc été alloué pour pallier partiellement cette situation en sous-traitant certaines tâches à une entreprise spécialisée dans les logiciels libres (Ipéos).



En 2023, les prestations de cette entreprise ont porté sur :

- la préparation de deux routeurs pare-feu redondants, basés sur du matériel spécifique et une solution logicielle libre dédiée à cet usage, en remplacement de notre système actuel fait maison et fonctionnant sur du matériel standard obsolète et énergivore. Ce travail ayant été sous-estimé, il n'a pu être réalisé que partiellement dans le temps imparti et fera l'objet d'une nouvelle commande de prestation. De plus, l'informaticien a analysé en profondeur les règles de filtrage réseau pour les simplifier drastiquement (si besoin en changeant quelques pratiques) avant transcription vers cette nouvelle solution logicielle.
- L'installation d'un nouveau serveur de courrier électronique, en émission et réception, avec gestion de groupes de discussions archivés et système de publication de lettre d'informations (pour nos bulletins et communiqués). Ce système remplacera prochainement nos systèmes maison obsolètes ;
- L'installation d'un nouveau serveur de sauvegarde ;
- L'installation d'un serveur d'inventaire GLPI pour faciliter la gestion du parc matériel, avec toutes les informations techniques, administratives et commerciales associées, et permettre de gérer des tickets d'incidents et de dysfonctionnements ;
- L'accompagnement de l'informaticien (AB) et d'un ingénieur (JN) pour l'usage de scripts Ansible adaptés à nos cas d'utilisation spécifiques.

En 2024, d'autres prestations par cette entreprise sont nécessaires, notamment :

- la finalisation des tâches commencées ;
- la mise en œuvre logicielle des nouveaux serveurs et du nouveau stockage, en une infrastructure de cluster basée sur Proxmox Virtual Environment 8, qui intègre désormais des technologies de pointe :
 - pour le stockage exigeant des performances : interne et répliqué en temps réel ; pour les gros volumes peu accédés, en externe ;
 - pour le réseau : son abstraction logicielle, simplifiant sa gestion tout en offrant davantage de fonctionnalités
- la centralisation des comptes utilisateurs et de leur authentification, pour simplifier leur gestion et réduire les risques de cybermalveillance ;
- la mise en place d'un réseau sans-fil interne sécurisé et authentifié avec portail captif pour nos visiteurs ;

> Système WebObs pour la recherche et la surveillance scientifique

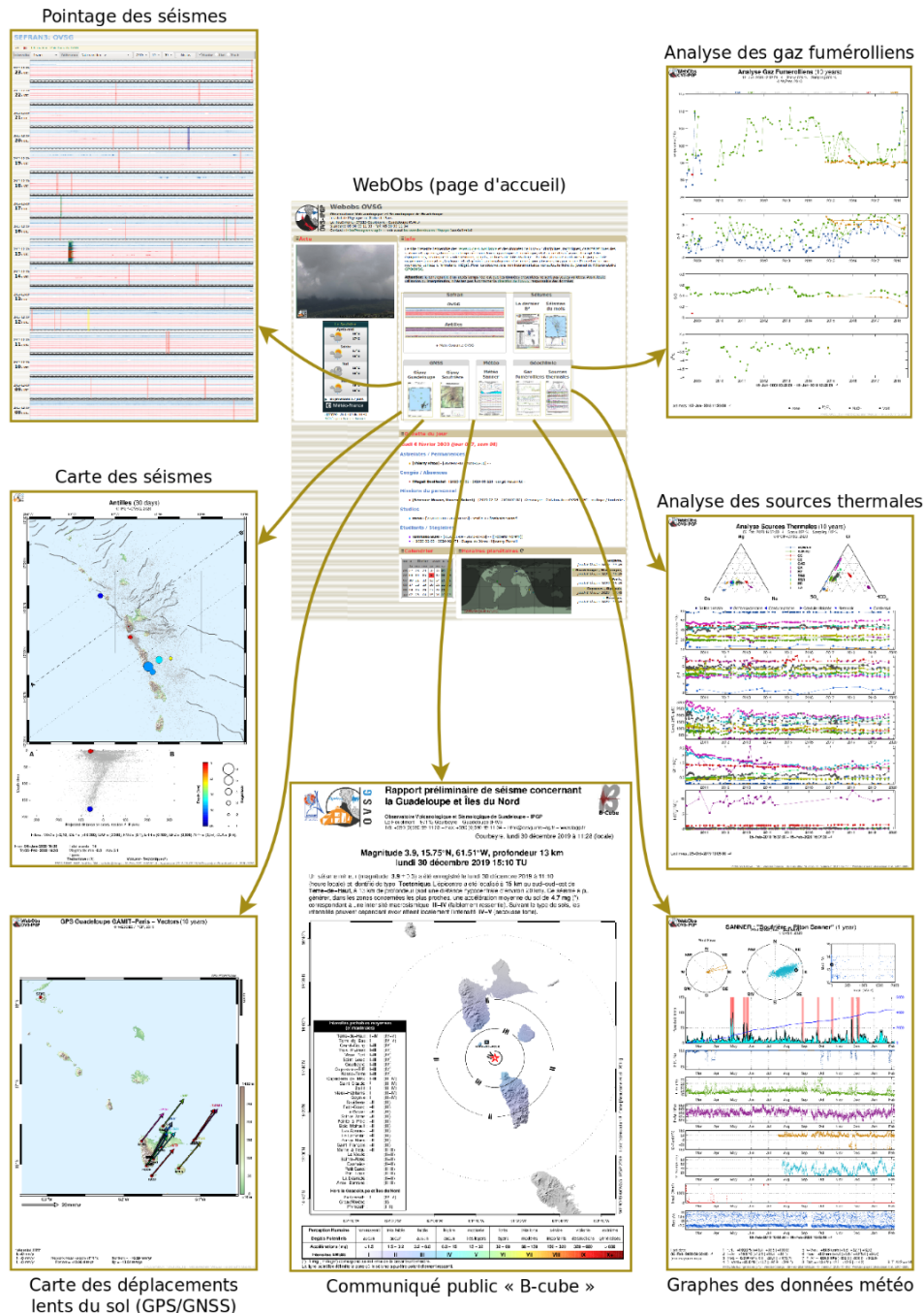
L'OVSG utilise le système WebObs, initialement développé à l'OVSG par son ancien directeur François Beauducel qui continue à en assurer et en partager le développement. C'est un système aujourd'hui utilisé par plusieurs observatoires volcanologiques et sismologiques à travers le monde, et qui se présente 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 (Fig. 39) :

- 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 ailleurs dans le monde.



En 2023, François Beauducel (IPGP) est venu présenter le fonctionnement interne de WebObs à ceux qui ne le maîtrisaient pas. L'informaticien (AB) et un ingénieur (JN) lui ont fait part de leurs suggestions de réforme en profondeur pour en simplifier la maintenance et le développement tout en augmentant fortement ses fonctionnalités pour les utilisateurs.





6. Recherche et collaborations

> Projets de recherche pilotés par les chercheurs de l'OVSG et l'ObsERA

Étude du système magmatique de la Soufrière

C. Berthod, J-C. Komorowski, I. Vlastelic, IPGP-OVSG, LMV-UCA

Financement : CNRS — INSU — Tellus — SYSTER AO 2023

La plupart des éruptions de la Soufrière de Guadeloupe sont des éruptions polyphasées caractérisées par une grande variété de styles éruptifs, de l'explosif à l'effusif (Komorowski et al., 2005 ; Legendre et al., 2012 ; Komorowski et al., 2021). L'origine de cette importante diversité est aujourd'hui mal comprise car le système magmatique de la Soufrière de Guadeloupe reste partiellement contraint (Metcalfe et al., 2022 et références associées). Or, cette variabilité de dynamismes éruptifs complexifie les stratégies de surveillance de l'activité et l'évaluation des aléas volcaniques dans l'espace et dans le temps et augmente considérablement le risque volcanique. Il est donc nécessaire d'améliorer notre compréhension du fonctionnement du volcan, de son système magmatique ainsi que des processus magmatiques associés.

Les systèmes magmatiques sont des systèmes complexes, impliquant une grande diversité de processus physiques et chimiques, depuis la genèse des magmas jusqu'à leur émission en surface. Les paramètres majeurs de l'activité volcanique, tels que les temporalités de réactivation des zones de stockage magmatiques, la fréquence d'éruption, leur durée, le volume de magma émis, ou encore le débit à l'évent, sont en grande partie contrôlés par la géométrie des systèmes magmatiques, leur profondeur ou encore la vitesse d'ascension du magma dans le conduit. La compréhension du fonctionnement des systèmes volcaniques passe donc par l'identification et l'étude du comportement de ces systèmes magmatiques. Il est en effet nécessaire d'avoir une information sur la géométrie du système magmatique alimentant l'édifice volcanique, mais également sur les processus physiques et chimiques actifs à l'intérieur de ces zones de stockage et de transfert, afin de comprendre leur dynamique et leur évolution dans le temps. Cette connaissance des processus magmatiques est inscrite dans les textures de la fraction juvénile (en termes de pourcentage, taille et distribution des vésicules et des cristaux) et dans la composition chimique des cristaux et des inclusions vitreuses intra-crystallines qui constituent une archive des processus magmatiques.

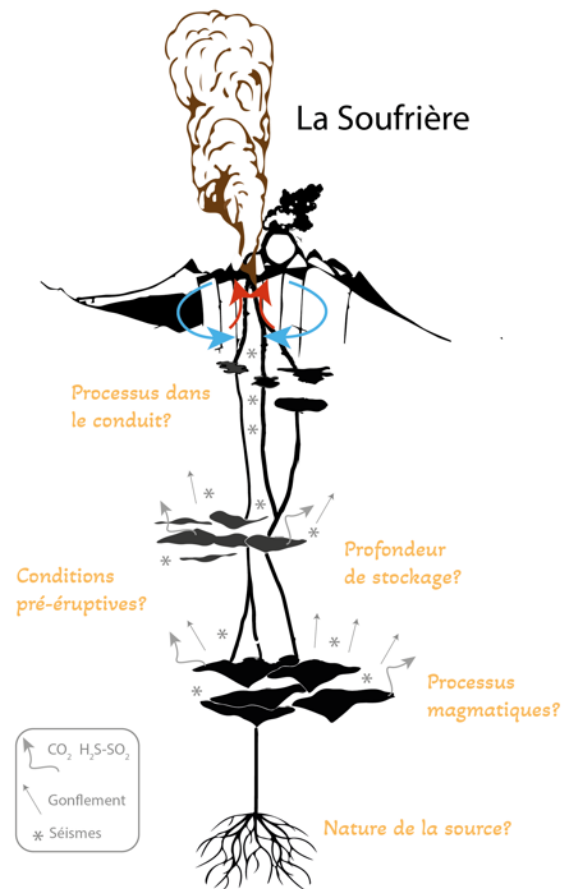
Ainsi, l'enjeu de ce projet est la reconstitution de l'évolution dans le temps du magma au sein du système magmatique, réservoirs et conduits, en se basant sur les compositions et les propriétés physiques des produits émis lors d'une éruption polyphasée de la Soufrière. L'objectif est donc de contraindre la dynamique de ce système dans son ensemble dans le but de comprendre et d'expliquer les possibles dynamismes éruptifs observés au courant d'une éruption. Ces données permettront de comprendre l'origine des changements de dynamismes syn-éruptifs impliquant des scénarios drastiquement différents et fournira par conséquent une base de connaissance pour les évaluations des crises futures ou en cours.



Événement éruptif polyphasé GDS 9 de 1080 Cal BC (2900 ans BP)

Pour ce projet, nous nous sommes focalisés sur l'événement éruptif polyphasé GDS 9 de 1080 Cal BC (2900 ans BP). Legendre (2012) propose que cette éruption ait commencé par une phase extrusive marquant la croissance d'un dôme dans le cratère Amic (PMD 5). Une partie ou la totalité de ce dôme se déstabilise ensuite, produisant un important écoulement pyroclastique concentré affectant tout le sud-ouest de la Basse-Terre (Fig. 40). La déstabilisation de flanc a lieu par la suite (AD 4), sans que l'on puisse contraindre les délais entre la mise en place des deux unités et le(s) phénomène(s) déclencheur(s). Cependant, l'absence de hiatus temporel ou érosionnel entre les deux unités, la concordance entre les nombreux âges radiocarbone obtenus pour les deux unités et la présence de très nombreux panneaux emballés de cette coulée pyroclastique dans les dépôts d'avalanches de débris, permettent d'en déduire que les deux unités se sont mises en place dans des délais relativement courts. Enfin, le positionnement de la phase explosive (PEM 7) au sein de cet événement éruptif est difficile à établir, mais Legendre (2012) fait l'hypothèse qu'elle a lieu après la phase éruptive à dôme (PMD 5) et la déstabilisation de flanc (AD 4).

Fig. 40 : Objectifs du projet positionnés dans le système magmatique schématisé de la Soufrière.



Dans ce projet, financé à hauteur de 9900 euros par l'INSU-CNRS, C. Berthod a effectué 3 missions à l'Institut de Physique du Globe de Paris et au Laboratoire Magma et Volcans de Clermont Ferrand en 2023 afin de réaliser une caractérisation pétrologique (lames minces, MEB et microsonde pour les analyses des différentes phases), géochimique (majeurs Fluo X et/ou ICP-AES ; traces ICP-MS ; isotopes du Sr, Nd, Pb), physique (densité/vésicularité, perméabilité, connectivité) et texturales (Crystal Size Distribution, Vesicle Size Distribution) des produits de cette éruption.

Les résultats de ces analyses sont actuellement en cours de traitement.

Références :

- Komorowski J.-C., Legendre Y., Metcalfe A., Moretti R., Moune S., Rosas-Carbajal M., Peruzzetto M., Jessop D., Burtin A., Beauducel F., de Chabalière J.B., Lemarchand L., Saurel J.-M., Le Friant A., Villemant B., Boudon G., Caron B., Esposti Ongaro T., Barsotti S., Neri A., Heap M. European Catalogue of Volcanoes. IPGP, BRGM, UCA-OPGC, ISTEP, Istituto nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Icelandic Meteorological Office. Retrieved from <https://volcanos.eurovolc.eu/?volcano=SDG#>.
- Komorowski, J.C., Boudon, G., Semet, M., Beauducel, F., Anténor-Habazac, C., Bazin, S., Hammouya, G., Lindsay, J.M., Robertson, R.E.A., Shepherd, J.B. and Ali, S., 2005. Volcanic hazard atlas of the Lesser Antilles. by J. Lindsay et al, pp.65-102.
- Legendre Y (2012) Reconstruction fine de l'histoire éruptive et scénarii éruptifs à la soufrière de Guadeloupe: vers un modèle intégré de fonctionnement du volcan. Thèse IPGP.
- Metcalfe 2022 A Insights into the origin and dynamics of past eruptions of La Soufrière de Guadeloupe from melt inclusions: implications for future unrest and environmental impact. Thèse, IPGP.



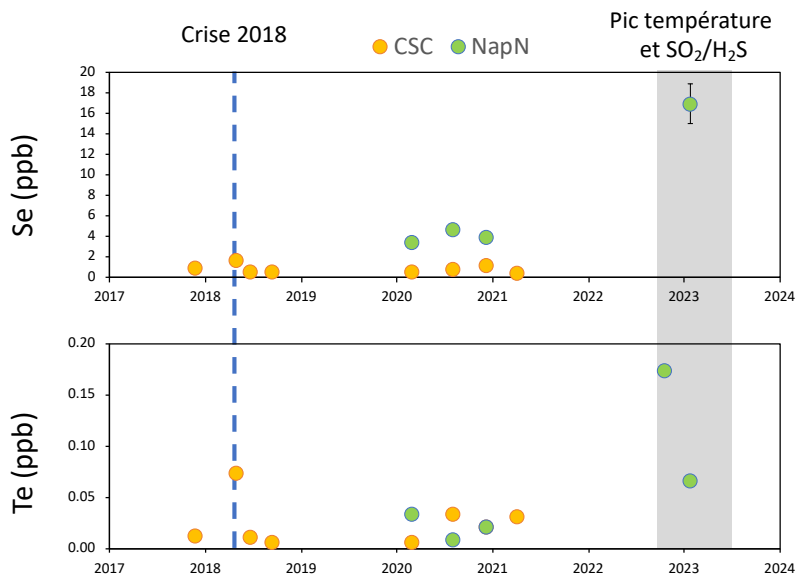
Cycle du Sélénium et du Tellure dans le système hydrothermal de La Soufrière de Guadeloupe

I. Vlastelic, C. Berthod, EL Chilin (OVSG - IPGP), J.L. Piro (LMV - OPGC)

Financement : CNRS — INSU — Tellus — SYSTER AO 2023 – AO 2024

Le suivi géochimique du système hydrothermal de la Soufrière de Guadeloupe repose essentiellement sur l'analyse des composants majeurs et mineurs des gaz (H_2S , CO_2 , SO_2 , CO , CH_4 , N_2 , O_2 , H_2 , HCl , Ar et He) et des fluides (Na^+ , K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} , F^- , Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^-) réalisé par l'OVSG-IPGP. En parallèle, le système hydrothermal est étudié ponctuellement à l'aide d'autres traceurs, plus lourds à mettre en œuvre, tels que les isotopes de l'hélium, du lithium, du zinc, du chlore, et les traces de métaux et métalloïdes. Ces mesures apportent des informations plus pointues et nuancées sur le fonctionnement chimique du système hydrothermal et sont donc très complémentaires des mesures réalisées pour le suivi. Dans ce cadre, ce projet a pour objectif d'explorer le comportement des éléments traces sélénium et tellure, véritables « voisins géochimiques » du soufre. Comme le soufre, le sélénium et le tellure font partie des éléments les plus volatils dans les systèmes magmatiques. Cependant, le sélénium et le tellure dégazent principalement sous forme d'espèces réduites (H_2Se , Se^0 , H_2Te , Te^0 , Te_2) alors que le soufre dégaze majoritairement sous forme oxydée SO_2 . Cette différence a une implication fondamentale : dans les conditions réductrices imposées par l'équilibre gaz-roche, SO_2 se transforme majoritairement en H_2S , alors que H_2Se et H_2Te ne peuvent se réduire davantage. Pendant la remontée des gaz, **Se et Te s'avèrent moins réactifs que le soufre**, moins affectés par des transitions rédox, et donc moins enclins à former plusieurs phases, et finalement d'une lecture plus simple.

Le sélénium étant présent dans la nature en quantités très faibles, de l'ordre du ppb, leurs concentrations sont mesurées par ID-HG-ICPMS (Isotopic Dilution – Hydride Generation – Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry). Cette méthode est basée sur l'ajout de traceurs isotopiques enrichis en ^{77}Se et ^{125}Te . Elle implique la séparation des éléments sur colonne échangeuse d'ion, et la mesure des rapports $^{78}Se/^{77}Se$ et $^{126}Te/^{125}Te$ sur spectromètre de masse couplé à un générateur d'hydrure. Il s'agit de la méthode la plus sensible et la plus précise pour la mesure des concentrations de Se et Te. Les analyses sont faites au Laboratoire Magmas et Volcans (LMV) de Clermont-Ferrand. Dans un premier temps, des tests avec différents types de prélèvements ont montré que les ampoules à soude sont plus efficaces que les condensats pour récupérer les gaz de sélénium (condensation partielle de Se). En revanche, les deux méthodes sont aussi efficaces pour les gaz de tellure, indiquant une condensation totale de Te. Les prélèvements sur ampoules ont donc été sélectionnés pour suivre la composition des gaz.



Les premières données (Fig. 41) montrent :
(1) un pic de Te (mais pas de Se) lors de la crise hydrothermale d'avril 2018, en accord avec la vaporisation d'une nappe enrichie en Te par percolation de gaz (type Tarissan, voir plus loin la section fluide)
(2) une augmentation importante des teneurs en Se et Te à NapN fin 2022- début-2023, coïncidant avec le pic de température et SO_2/H_2S . La covariation Se-Te indique l'implication directe de gaz magmatiques pendant cette période. Ces tendances devront être affinées par plus de mesures

Figure 41 : Evolution de la composition du gaz. Les analyses de Se et Te dans la soude des ampoules ont été combinées aux données déjà acquises (composition en espèces majeurs et masse molaire du gaz piégé, Moretti et al., 2020) pour calculer les concentrations massiques de Se et Te dans le gaz piégé.



Des analyses ont également été réalisées sur les principales sources thermales (Galion, Galion Blanc, Ravine Goyavier, Tarade, Pas du Roy, Bain Jaune Supérieur, Bains Chauds Matouba, Habitation Revel, Carbet Echelle, Chute du Carbet) couvrant une gamme de température de 21 à 58°C, ainsi que sur des fluides acides à ébullition (~100°C) du lac Tarissan (2019-2022) (Fig. 42).

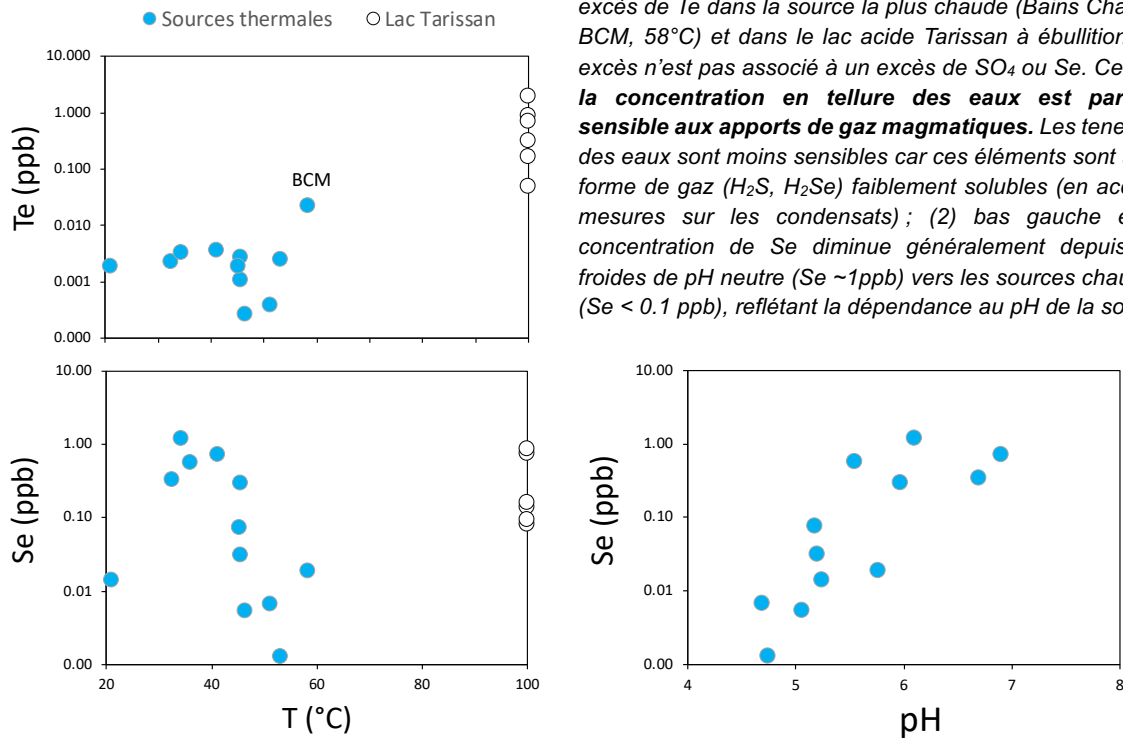


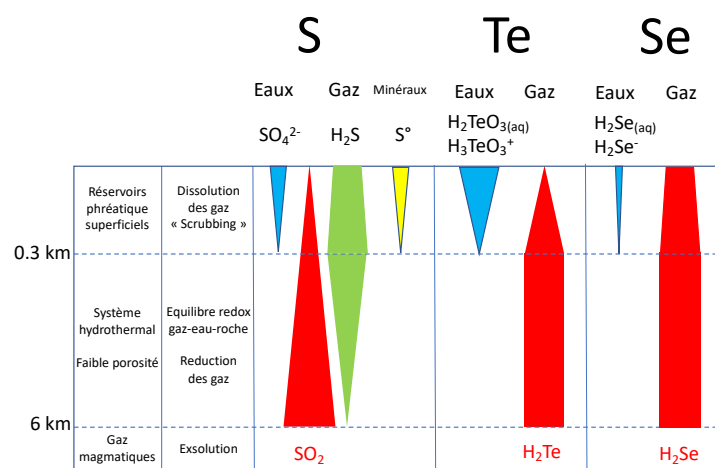
Figure 42: Les analyses des eaux montrent : (1) gauche-haut : un fort excès de Te dans la source la plus chaude (Bains Chauds Matouba, BCM, 58°C) et dans le lac acide Tarissan à ébullition (100°C). Cet excès n'est pas associé à un excès de SO₄ ou Se. Cela indique que la concentration en tellure des eaux est particulièrement sensible aux apports de gaz magmatiques. Les teneurs en S et Se des eaux sont moins sensibles car ces éléments sont apportés sous forme de gaz (H₂S, H₂Se) faiblement solubles (en accord avec nos mesures sur les condensats); (2) bas gauche et droite : La concentration de Se diminue généralement depuis les sources froides de pH neutre (Se ~1ppb) vers les sources chaudes et acides (Se < 0.1 ppb), reflétant la dépendance au pH de la solubilité de Se.

Les résultats obtenus sur les gaz (condensats et ampoule à soude), les sources thermales et le lac acide Tarissan permettent d'identifier les principales différences de comportement entre S, Se et Te, et de proposer un schéma d'interprétation de la systématique S-Se-Te (Fig. 43).

Fig. 43 : Illustration simplifiée de la différence de comportement de S, Se et Te dans le système hydrothermal de la Soufrière :

S : le SO₂ ayant survécu à l'équilibre redox gaz-roche, se dissout dans les eaux de surface sous forme de sulfates, si bien que très peu de SO₂ arrive en surface. S forme aussi des minéralisations (S°).
Te : H₂Te n'est pas affecté par l'équilibre redox, mais se solubilise sous forme oxydée dans les eaux de surface. La teneur en Te des eaux thermales est un bon proxy du flux de gaz magmatique
Se : H₂Se n'est pas affecté par l'équilibre redox et se solubilise peu (H₂Se_(aq) et H₂Se⁻) dans les eaux de surface acides (pH<6) Le flux de H₂Se magmatique est efficacement transféré en surface.

La faible solubilité de Se dans les eaux (comparée à S et Te) est due au fait que la réduction des sélénides en sélénates requiert des conditions plus oxydantes (que celles nécessaires à l'oxydation de S ou Se) qui ne sont pas atteintes dans les eaux thermales.





SOUFRIERE FACTORY: Etude intégrée du fonctionnement magmatique, hydrothermal et hydrogéologique de La Soufrière de Guadeloupe

I. Vlastelic & équipe (OVSG-IPGP), M.-L. Bernard (UA), Y. de la Torre (BRGM)

Financement : Contrat de Convergence et de Transformation de la Guadeloupe (AO 2024 – 2027)

Le projet propose une approche intégrée du système volcanique, en considérant la continuité des processus et des flux depuis sa source magmatique et son système hydrothermal jusqu'aux structures géologiques superficielles, la nappe phréatique, et l'interface volcan-atmosphère. Le programme de recherche s'articule autour de quatre tâches (WP) :

(1) La première, pilotée par l'OVSG et le LaRGE, a pour objectif de caractériser les paramètres physiques et chimiques du système magmatique profond et de détecter d'éventuelles évolutions temporelles rapides. Cette tâche consistera à caractériser finement la minéralogie et la texture des produits solides du volcan (roches, scories et cendres juvéniles) de manière à reconstituer les conditions de stockage des magmas. Elle s'appuiera sur l'étude des éruptions passées (28 éruptions au cours des 50 derniers milliers d'années). Un objectif majeur consistera à documenter la zonation chimique des minéraux pour reconstruire l'évolution de la chambre magmatique peu avant une éruption et identifier les processus déclencheurs. La zonation sera également couplée à l'analyse de la texture, de la densité, de la porosité connectée et non-connectée des produits éruptifs pour estimer la vitesse de remontée des magmas. Ces analyses apporteront des informations cruciales sur les délais possibles entre les signaux précurseurs détectés par les instruments de l'OVSG et l'arrivée du magma en surface. Une meilleure connaissance de ces délais, qui peuvent aller de quelques jours à quelques années, est fondamentale pour ajuster la réponse des autorités et la protection des populations. Pour réaliser cette tâche, nous créerons un laboratoire de pétrologie à l'OVSG, équipé des équipements de base (scie, polisseur, microscope) pour caractériser la minéralogie et la texture des produits solides de la Soufrière. Nous nous appuyerons également sur les moyens analytiques disponibles à l'université des Antilles (LaRGE, C3MAG).

(2) La seconde tâche pilotée par l'OVSG, le LaRGE et l'ObsERA consiste à caractériser les propriétés physico-chimiques des émissions (fluides et gaz) en surface, au niveau des fumerolles sommitales et des sources chaudes sur les flancs du volcan. L'analyse des espèces majeures (H₂S, CO₂, SO₂) dans le panache de gaz sera réalisée in situ à l'aide d'un analyseur portable (MultiGAS). Elle permettra de suivre l'évolution du système hydrothermal, et en particulier le degré d'interaction des gaz avec les roches encaissantes et le système hydrologique. Ces mesures permettront à la fois de suivre la réactivation du volcan et d'évaluer l'impact des émissions sur l'environnement. L'analyse des gaz présents à l'état de traces dans les fumerolles (gaz rares, CH₄, H₂, CO) sera effectuée par spectrométrie de masse dans les laboratoires de l'OVSG sur des prélèvements réalisés dans les fumerolles. Ces gaz inertes nous renseignent sur les conditions thermodynamiques du système hydrothermal (pression, température et conditions rédox), et permettent de détecter très précocement les transferts de gaz magmatiques, potentiellement associés à la décompression de magma (i.e, remontée). Nous renforcerons ce suivi des gaz par un suivi thermique, avec la mise en place de sondes de température téléométrées dans les principales fumerolles actives. En parallèle, nous suivrons la composition d'une dizaine de sources thermales (cations et anions majeurs mesurés par chromatographie ionique), avec une attention particulière sur les cinq sources du flanc sud de la Soufrière en cours de réchauffement. Ces mesures contribueront au suivi de la réactivation du volcan et à l'évaluation de son potentiel géothermique, et son impact sur l'environnement et les ressources en eau.

(3) La troisième tâche, pilotée par le BRGM en collaboration avec l'OVSG et le LaRGE, consiste à réaliser une reconnaissance géologique et structurale fine de la partie supérieure de l'édifice (dans un rayon de 2 à 3 km autour du sommet de la Soufrière de Guadeloupe). Elle implique une cartographie homogène à l'échelle de la partie supérieure de l'édifice des formations géologiques en surface ainsi que de leur degré d'altération et/ou de fracturation. Une interprétation couplée avec l'analyse des données TDEM (électromagnétique en domaine temporel) devrait permettre d'interpréter en profondeur (200 à 300 premiers mètres) l'extension des grandes structures géologiques et leur interaction avec le système hydrologique superficiel. Des analyses fines des formations superficielles (structure, propriété physique, etc.) couplées à des mesures de la perméabilité (essai double anneau) devraient par ailleurs nous permettre d'obtenir de précieuses contraintes sur les zones de ruissellement ou d'infiltration alimentant les aquifères superficiels. Ces données permettront d'élaborer un modèle hydrogéologique conceptuel caractérisant le fonctionnement du site. Seront en particulier précisés les discontinuités structurales mises en évidence par la géophysique et les reconnaissances de terrain, la géométrie des horizons potentiellement aquifères et non aquifères, ainsi que les zones d'alimentation et d'exutoire des horizons aquifères. Ces éléments apporteront des compléments d'informations indispensables au calcul d'un bilan hydrique fiable du secteur, et permettront d'orienter finement les choix des prospections hydrogéologiques.



(4) La quatrième tâche rassemble les quatre partenaires. Elle a pour objectif d'intégrer l'ensemble des mesures et élaborer un modèle dynamique multi-paramètres de fonctionnement du système Soufrière, pour l'anticipation de son évolution future

Projet Région – FEDER IMMERGE – Impact multi-environnemental des retombées volcaniques et sahariennes en Guadeloupe (Coordinatrice : Céline DESSERT)

La Guadeloupe est fortement exposée aux aérosols naturels, parmi lesquels les aérosols d'origine volcanique et saharienne qui peuvent avoir un impact environnemental et sanitaire important sur le territoire guadeloupéen et ses habitants. Dans le cadre du projet FEDER-Région Guadeloupe pluridisciplinaire IMMERGE, 4 organismes de recherche (IPGP-OBSERA-OVSG ; INRAE ; Institut Pasteur de la Guadeloupe ; Université des Antilles – Pôle Guadeloupe) et l'association Gwad'air se sont associés pour mieux comprendre les différents impacts des aérosols sur : la santé publique, l'acidification des sols au voisinage de la Soufrière (aérosols volcaniques), la fertilisation des sols de l'archipel par les poussières sahariennes, le climat local ou régional lié au passage des brumes désertiques sahariennes. Dans ce but, le projet IMMERGE s'attache à :

Quantifier et caractériser les émissions et dépôts volcaniques de la Soufrière, ainsi que les retombées de brumes sahariennes d'un point de vue physique, chimique et microbien (transport d'agents microbiens par les poussières sahariennes) ;

Étudier l'impact multi-environnemental des gaz-aérosols volcaniques, ainsi que des poussières sahariennes, sur les sols, les écosystèmes, la population vivant au sud de la Basse-Terre ou encore le climat local/régional.

Le projet IMMERGE a notamment permis des avancées majeures dans le domaine de la caractérisation chimique des aérosols volcaniques de la Soufrière. En relation avec l'association Gwad'air, le projet a initié une enquête en ligne sur les ressentis d'odeurs de gaz soufrés dans le secteur du volcan de la Soufrière (lien sur la page Facebook : <https://www.facebook.com/immerge.guadeloupe>). En 2023, le projet a financé les stages de Lilian Hebrard (Stage Master 2 Recherche IPGP, direction A. Burtin, sujet : Localisation de signaux sismiques de type trémor harmonique à la Soufrière de Guadeloupe) et de Titouan Wendling (Stage Master 1 Recherche IPGP, direction I. Vlastelic, sujet : Étude de la chimie des sources thermales de La Soufrière) avant de se terminer le 31 Juillet 2023.

> Recherche en collaboration

Impact atmosphérique du dégazage de la Soufrière (S. Moune, D. Jessop, LMV - UCA)

Dans le cadre des projets pilotés par S. Moune, une première étude (Rave-Bonilla et al., 2023) a modélisé numériquement la dispersion du panache de La Soufrière afin de déterminer l'exposition aux gaz volcaniques (particulièrement H₂S) des habitants des communes localisées sous les vents dominants (Fig. 44). L'étude a estimé la probabilité que la concentration de gaz dépasse les seuils établis pour l'exposition chronique. Pour la commune de Matouba, elle conclut qu'il existe une probabilité non négligeable (40-60%) de dépasser le seuil d'exposition établie pour l'espérance de vie humaine, ce qui souligne la nécessité de surveiller la qualité de l'air volcanique dans de telles zones.

Une seconde étude (Metclafe et al. 2023) a estimé que les deux éruptions pliniennes de 1010 CE et 5680 BCE ont été associées à des pics d'activité avec un forçage radiatif effectif moyen de -0,022 à -0,035 W/m² (Fig. 45). Même s'il est peu probable que ces événements aient perturbé le climat de manière significative, ils ont cependant contribué au "bruit de fond" des aérosols volcaniques stratosphériques. Les autres petites éruptions de La Soufrière de Guadeloupe étudiées ont exercé un forçage climatique négligeable en raison de la faible quantité de SO₂ qu'elles ont émise.

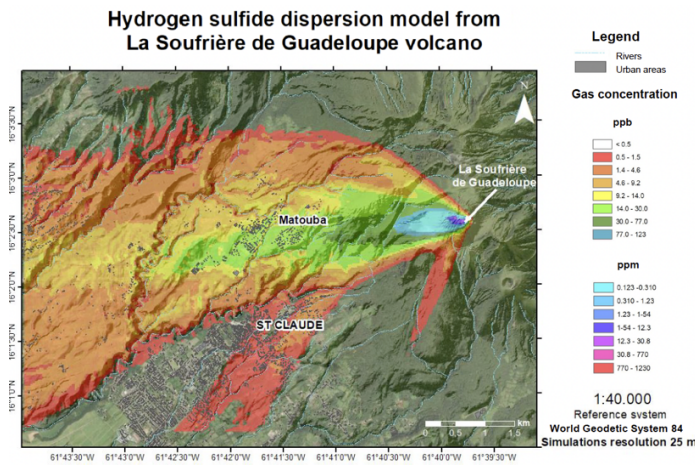
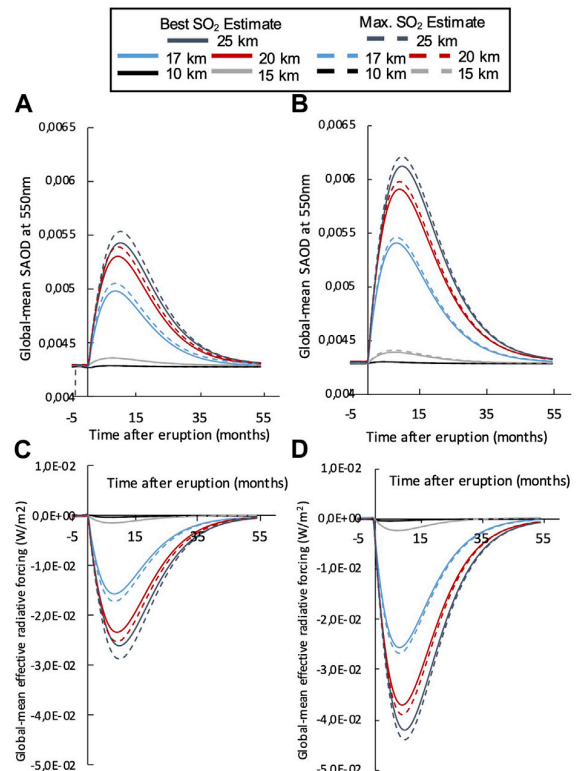


Fig. 44 (haut) : modélisation numérique de la dispersion du panache de La Soufrière (Rave-Bonilla et al., 2023).

Fig. 45 (droite) : estimation de l'épaisseur optique des aérosols et du forçage radiatif après les éruptions de 1010 CE et 5680 BCE de La Soufrière Metclafe et al. 2023)



Température, flux CO₂, et polarisation spontanée du dôme de la Soufrière (D. Jessop, A. Klein, F. Donnadiou, LMV - UCA)

Ce projet vise à estimer les flux de fluides en subsurface de la Soufrière par des profils de température, du dégazage du CO₂ et de la Polarisation Spontanée (PS). En 2023, deux nouvelles campagnes de terrain ont permis d'acquérir de nouvelles mesures sur un grand nombre de sites, qui sont ensuite été interpolées géo-spatialement à l'aide de simulations gaussiennes séquentielles (sGs). Des images thermiques aériennes, réalisée à l'aide du drone DJI M210 RTK, ont été utilisées pour produire des ortho-images du sommet de la Soufrière et des sites sur ses flancs (FTY, Matyilis, Ravine Claire et zones de Breislak). Ces ortho-images viennent compléter la série débutée en novembre 2021 avec une fréquence d'acquisition de 6 mois-1 an, environ. Suite à des discussions avec F. Beauducel, elles seront bientôt disponibles sur WebObs.

Les données des campagnes de 2021 et 2022 sont l'objet d'un article en cours de publication (Klein, A., 2024, sous presse). Ces données illustrent clairement la zone de dégazage du sol anormalement élevé dans la Zone Fumerolienne Napoléon Nord (ZFNN), au nord de la fracture Napoléon et à l'est de la structure Tarissan/Cratère Dupuy/Fente du Nord, alors que le dégazage est généralement faible ailleurs, sauf autour de Cratère Sud (Fig. 46). En intégrant les résultats du dégazage sur la zone d'exhalaison, nous obtenons une production totale de CO₂ de 4,20±0,86 tonnes/jour, soit environ la moitié de la somme des émissions de CS, G56 et TAR déterminées à partir des traversées MultiGAS (8,13 tonnes/jour, Moune et al., 2022). Nos résultats indiquent également que la perméabilité du sol dans la ZFNN est beaucoup plus grande que dans d'autres zones du sommet du volcan, ce qui, avec l'augmentation du dégazage, est en accord avec les observations phénoménologiques faites par le personnel de l'OVSG et de l'IPGP.

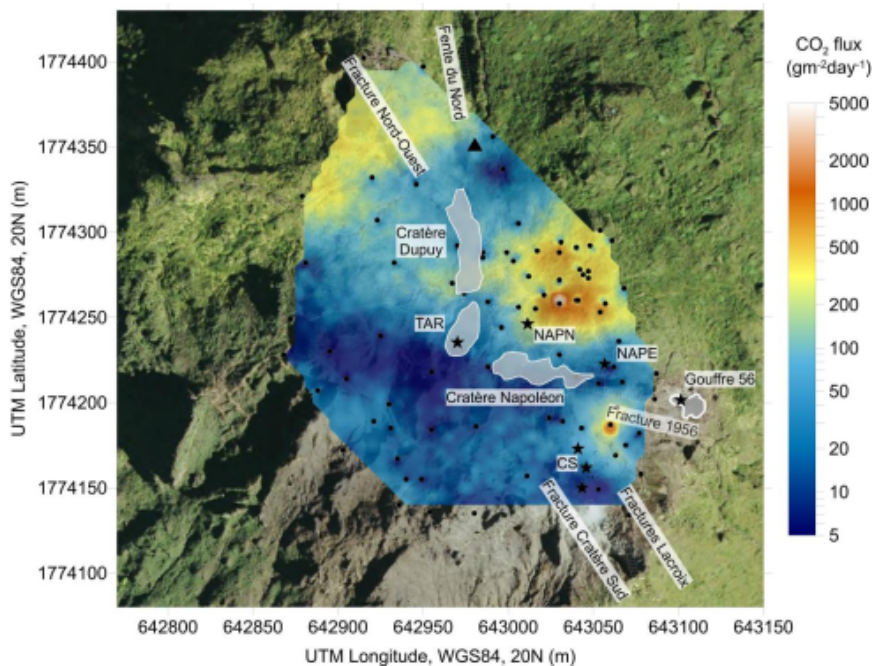


Fig. 46 : Cartographie du flux de CO₂ dans le sol au sommet de la Soufrière de Guadeloupe (Klein, A., D. E. Jessop, F. Donnadieu, J. Pierre, and R. Moretti, Dome permeability and fluid circulation at La Soufrière de Guadeloupe implied from soil CO₂ degassing, thermal flux and self-potential, *Bulletin of Volcanology*, 2024, sous presse)

The microbiome of volcanic plumes (Fidel Costa, IPGP, and Stephan Schuster, Nanyang Technological University, Singapour)

L'objectif global du projet est de découvrir si les panaches volcaniques et les fumerolles peuvent transporter des micro-organismes tels que des bactéries vivant dans le sol des volcans, quels sont ces organismes et leur relation avec d'autres observables tels que la température et la composition du panache/fumerole. A cet effet, Fidel Costa (IPGP) et Stephan Schuster (Nanyang Technological University, Singapour) se sont rendus en Guadeloupe entre le 8 et le 13 avril 2023. Ils ont effectué un travail de terrain assisté principalement par Carole Berthod et consistant à échantillonner l'air ambiant dans différentes parties de l'île, mais spécialement dans le cratère de la Soufrière, à différentes distances des fumerolles. Au total, 15 échantillons ont été collectés sous forme de filtres en papier et analysés en laboratoire par l'équipe de S. Schuster à Singapour. L'analyse métagénomique préliminaire a révélé plusieurs espèces de méthyllobactéries associées aux fumerolles volcaniques, avec les abondances les plus élevées au Cratère Sud. Une autre découverte est que la composition métagénomique de la fumerole Napoléon Nord est différente de celle des autres fumerolles, ce qui implique que cette fumerole pourrait provenir au moins en partie d'une source différente des autres. Une première ébauche de manuscrit avec les principales conclusions est déjà réalisée. Nous avons maintenant commencé à compiler des informations supplémentaires sur les températures et la composition des fumerolles. Il pourrait être nécessaire de collecter et d'analyser des échantillons supplémentaires des sols autour des fumerolles et de l'eau/sédiments du lac acide Tarissan pour mieux comprendre les sources de la bactérie.

Cartographie sous-marine des embouchures des grandes rivières de la Basse-Terre, réalisée dans le cadre du projet Interreg Caraïbes PREST (A. Potier, S. Deroussi, E. Lajeunesse, IPGP)

Dans le cadre du projet PREST (programme Interreg V Caraïbe) piloté par l'Observatoire volcanologique et sismologique de Martinique (OVSM), l'OVSG a contribué, par son appui logistique, au déploiement du sondeur multifaisceaux pour le levé bathymétrique à très haute résolution des fonds marins au large des embouchures des grandes rivières de Vieux Habitants et de Capesterre (sites d'Obsera) (20 – 22 Juin 2023).



Projet ANR MYGALE - Modélisation phYsico-chimique des Gradients de l'ALTération hydrothermale: sentinelle de la dynamique d'instabilité gravitaire des volcans Explosifs (M. Heap, Université de Strasbourg ; Caroline Martel, Institut des Sciences de la Terre d'Orléans ; Marina Rosas-Carbajal, IPGP)

Dans le cadre du projet ANR MYGALE (Modélisation phYsico-chimique des Gradients de l'ALTération hydrothermale: sentinelle de la dynamique d'instabilité gravitaire des volcans Explosifs) débuté en 2021 plusieurs chercheurs de l'Institut Terre & Environnement de Strasbourg et de l'Institut de Physique du Globe de Paris ont collaboré en 2023 avec l'OVSG pour étudier l'influence de l'altération hydrothermale sur les risques volcaniques (<https://ites.unistra.fr/recherche/equipes/ge/ge-perso/anr-project-mygale>).

Dans une première étude (Heap et al. 2023a), nous avons combiné des expériences en laboratoire sur des échantillons prélevés à La Soufrière de Guadeloupe avec une modélisation Particle Flow Code (PFC) à grande échelle pour montrer que les dômes altérés, ou contenant une zone d'altération, sont plus faibles lorsqu'ils sont saturés d'eau (Fig. 47, gauche). Ce résultat aide à expliquer le lien entre l'altération, les précipitations et les événements de perte de masse à La Soufrière de Guadeloupe et sur des volcans similaires dans le monde. Dans une deuxième étude (Heap et al., 2023b), nous avons utilisé une approche multi-échelle pour évaluer l'hétérogénéité des roches altérées de La Soufrière de Guadeloupe. Nos données montrent que les roches sont très hétérogènes (Fig. 47, droite) et la modélisation multi-échelle montre que cette hétérogénéité peut réduire la résistance d'un échantillon de la taille de ceux étudiés et, en utilisant des modèles à grande échelle, la stabilité d'un dôme de lave. Dans d'autres travaux, nous avons montré (1) comment l'altération hydrothermale et la saturation en eau peuvent influencer les propriétés thermiques des roches altérées de La Soufrière de Guadeloupe (Heap et al., 2023c) et (2) que la spectroscopie de réflectance VNIR-SWIR pourrait être utilisée comme outil pour cartographier l'altération et estimer les propriétés physiques des roches des volcans, à l'aide de données collectées sur les roches de La Soufrière de Guadeloupe (Kereszturi et al., 2023).

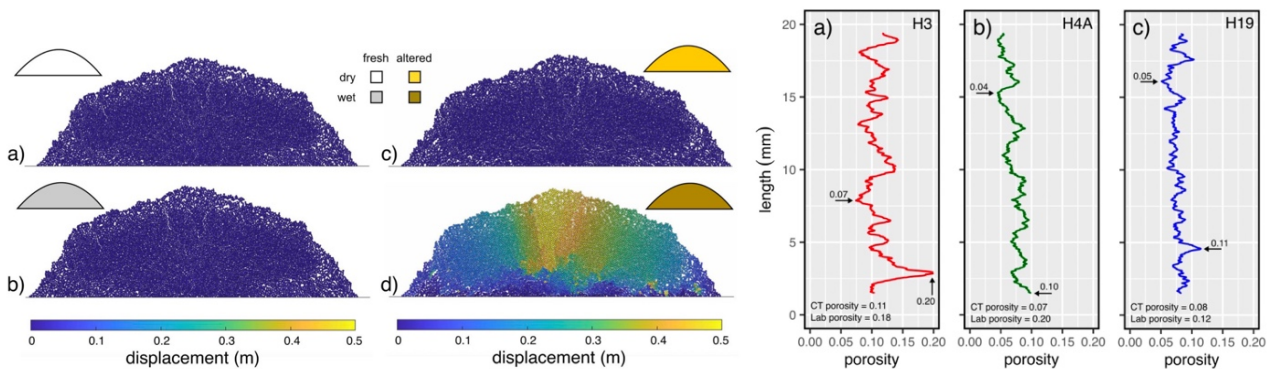


Fig. 47. Gauche : Utilisation du code Particle Flow pour étudier l'influence de la saturation en eau sur les dômes secs et humides (d'après Heap et al., 2023a). Droite : Données de microtomographie à rayons X montrant la variation de porosité d'un échantillon de roche étudié provenant de La Soufrière de Guadeloupe (d'après Heap et al., 2023b)

Les travaux en cours et à venir, dans le cadre de MYGALE, se concentrent sur (1) l'étude de l'influence de l'altération hydrothermale sur la cohésion et l'angle de frottement interne des roches de La Soufrière de Guadeloupe, (2) l'étude des propriétés de frottement des matériaux altérés de La Soufrière de Guadeloupe, (3) cartographier la résistance et l'hétérogénéité d'altération du dôme de La Soufrière de Guadeloupe, (4) déterminer les taux d'altération à l'aide d'expériences d'écoulement à haute pression et haute température, et (5) montrer l'étendue, en 3D, de la zone d'altération hydrothermale de La Soufrière de Guadeloupe à partir des données collectées lors de notre campagne de terrain en 2022 au cours de laquelle nous avons réalisé une vaste campagne de tomographie par résistivité électrique (ERT) sur le dôme.

Toutes ces études, et celles actuellement en cours, contribuent à améliorer notre compréhension de la manière dont l'altération hydrothermale influence les risques volcaniques à La Soufrière de Guadeloupe, améliorant ainsi notre capacité à surveiller le volcan et à atténuer les risques volcaniques futurs.



Projet ANR MEGaMu - Caractérisation temporelle haute résolution des processus géothermiques utilisant conjointement l'ERT, la gravimétrie et la muographie ; S. Bouteille, Julien Gance, IRIS INSTRUMENTS ; M. Diament, S. Deroussi, G. Metivier, O. Jamet, IPGP ; D. Gibert , Y. Le Gonidec, Géosciences Rennes)

Dans un contexte de développement des énergies renouvelables et en particulier de la géothermie, le projet MEGaMu a pour but d'améliorer les méthodes disponibles pour les scientifiques et les industriels voulant comprendre les zones géothermales. En effet, ce sont des systèmes souterrains complexes qui sont difficiles à mesurer et à modéliser. L'approche proposée est novatrice, basée sur la combinaison de méthodes bien connues des géophysiciens (méthodes sismiques, gravimétriques et à courant continu) avec une technique émergente : la tomographie muonique. Les données récoltées par chacune des méthodes vont pouvoir se contraindre les unes les autres ce qui va permettre de mesurer les phénomènes géothermaux avec une résolution spatiale et temporelle sans précédent. De plus, le projet a pour objectif d'améliorer les techniques de mesures pour répondre aux besoins d'abord des scientifiques étudiant les zones géothermales et ensuite des industriels devant les exploiter et les monitorer.

Thermique (J. de Bremond d'Ars, D. Gibert, F. Nicollin, B. Kergosien, Y. Le Gonidec)

En 2023, plusieurs missions de terrain ont permis de réactiver les dispositifs instrumentaux au sommet du dôme dans l'objectif d'obtenir des données continues sur une longue durée afin de comprendre le fonctionnement du système hydrothermal (cf. Bremond d'Ars et Gibert (2022) Low-Temperature Hydrothermal Systems Response to Rainfall Forcing: An Example From Temperature Time Series of Fumaroles at La Soufrière de Guadeloupe Volcano. *Front. Earth Sci.* 9:772176. doi: 10.3389/feart.2021.772176). L'alimentation électrique, les centrales d'acquisition de données et la liaison avec l'observatoire ont été remises en service. Un sismomètre a été installé à proximité du cratère sud et des sondes de température ont été insérées dans les fumerolles nord et sud du cratère sud. Les quelques jours de données qui ont pu être recueillis ont permis 1) de valider l'augmentation significative de la température des fumerolles, 2) de constater que le comportement oscillatoire de la fumerolle centre -aujourd'hui inactive- observé jadis a été transféré à la fumerolle nord et 3) de mettre en évidence les faiblesses techniques du dispositif afin de contraindre une nouvelle version de capteurs qui sera installée début 2024 (Fig. 48).



Fig. 48a. Installation d'un sismomètre Trillium 20s à proximité du cratère sud



Fig. 48b. Acquisition des températures des fumerolles du cratère sud

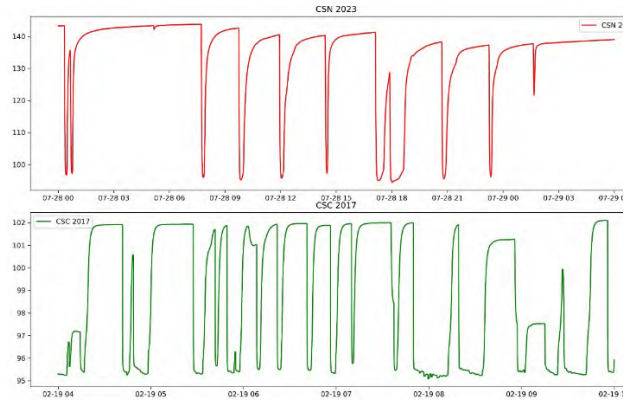


Fig. 48c. Comparaison du caractère oscillatoire de la température des fumerolles CSN 2023 vs. CSC 2017

Muographie de la Soufrière (T.avgitas¹, S.Cuzon¹, J.C.Ianigro¹, J.Marteau¹, R.Bajou², M.Rosas-Carbajal²; 1 : IP2I, 2 : IPGP)

La muographie est une nouvelle technique d'imagerie utilisant des particules élémentaires produites naturellement dans l'atmosphère comme les rayons X de l'imagerie médicale. La partie la plus abondante de ces particules est constituée de muons, particules chargées appartenant à la même famille que les électrons – les leptons – mais avec une section efficace d'interaction avec la matière bien plus faible. Cette propriété fait des muons une puissante sonde des distributions internes de la matière grâce à leur probabilité de transmission et/ou de diffusion. Depuis 2010, différents prototypes de détecteurs de muons ont été déployés



et exploités autour du dôme de la Soufrière de Guadeloupe avec les projets Domoscan, Diaphane et Megamu financés par l'ANR. Ces projets ont réalisé des images statiques 2D à partir de 6 points de vue différents (Parking Savane à Mulets, Savane Sud-Ouest, Rocher Fendu, Ravine Sud, Faille du 30 Août, Fente du Nord), des images 3D dans une analyse jointe avec la gravimétrie, un suivi PCA dans le temps des contenus internes, et de nombreux développements méthodologiques.

Au total ces activités ont permis la réalisation de 3 thèses de doctorat, la plus récente étant celle de R. Bajou qui a soutenu en juin 2023 (figure 49 gauche : reconstruction 3D du dôme réalisée dans ce contexte), la publication d'un article par an en moyenne dans une revue à comité de lecture et de nombreuses conférences invitées ou posters dans les grandes conférences du domaine (AGU, EGU, JpGU, IPRD, NDIP etc).

Actuellement deux stations de muons collectent des données (Rocher Fendu et Faille du 30 août), tandis qu'une troisième attend d'être installée à proximité de la nouvelle plateforme sur le parking SAM. Ils fonctionnent quasiment en continu et aucune opération de maintenance n'a été entreprise sur les détecteurs eux-mêmes en 2023 (seulement le remplacement d'une antenne wifi). L'ensemble des données 2023 du détecteur de la Faille du 30 août est affiché sur la figure 49 (droite).

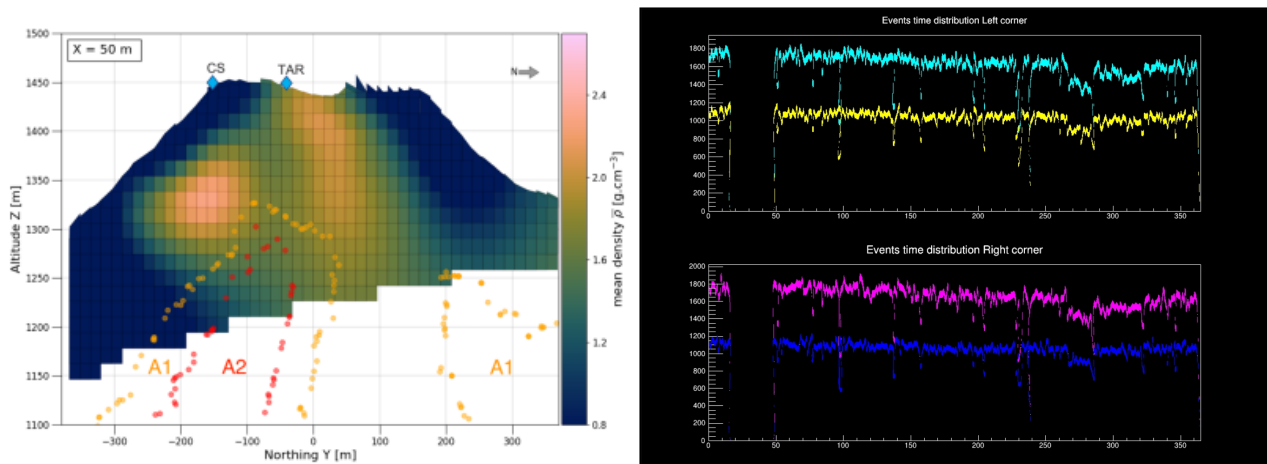


Figure 49 : Gauche : coupe verticale du modèle de densité 3D obtenu dans la thèse de R. Bajou, superposée aux points iso-contours des anomalies conductrices électriques. Droite : série temporelle 2023 du détecteur de muons de la Faille du 30 août, divisée en quarts de la fenêtre d'acceptation.

> Publications

Articles

Barsotti S, Scollo S., Macedonio G., Felpeto Rielo A., Peltier A., Vougioukalakis G., de Zeeuw - van Dalssen E., Ottemöller L., Pimentel A., Komorowski J.-C., Loughlin S., Carmo R., Coltelli M., Corbeau J., Vye-Brown C., Di Vito M., de Chabalière J.-B., Ferreira T., Fontaine F.R., Lemarchand A., Marques R., Medeiros J., Moretti R., Anne Pfeffer M., Saurel J.-M., Vlastelic I., Vogfjörd K (2024, sous presse) European Volcano Observatories and their use of the aviation colour code. Bulletin of Volcanology.

Diament M., Lion G., Pajot-Métivier G., Merlet S., Deroussi S. The Absolute field Quantum Gravimeter, a promising sensor for volcano monitoring. IEEE Instrumentation & Measurement Magazine, en révision.

Gillet O, Daudé É, Saval A, Caron C, Taillandier P, Tranouez P, Rey-Coyrehourcq S, Komorowski J.-C (2023) Modeling staged and simultaneous evacuation during a volcanic crisis of La Soufrière of Guadeloupe (France). SIMULATION. doi:10.1177/00375497231209998.

Gillet O, Daudé É, Gherardi M., Leone F. et Komorowski J.-C. (2023) « La Soufrière de Guadeloupe : la population est-elle prête à faire face à une nouvelle crise volcanique ? », EchoGéo, 64, URL : <http://journals.openedition.org/echogeo/25521> ; DOI : <https://doi.org/10.4000/echogeo.25521>.



- Heap, M. J., Harnett, C., Farquharson, J., Baud, P., Rosas-Carbajal, M., Komorowski, J. C., Violay, M.E., Gilg, H.A., & Reuschlé, T. (2023a). The influence of water-saturation on the strength of volcanic rocks and the stability of lava domes. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 107962. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2023.107962>.
- Heap, M.J., Harnett, C.E., Nazarbayov, T., Heng, Z., Baud, P., Xu, T., Rosas-Carbajal, M. and Komorowski, J.C. (2023b). The influence of heterogeneity on the strength of volcanic rocks and the stability of lava domes. *Bulletin of Volcanology*, 85(9), 49. <https://doi.org/10.1007/s00445-023-01669-6>.
- Heap, M.J., Wadsworth, F.B., and Jessop, D.E. (2023c). The thermal conductivity of unlithified granular volcanic materials: The influence of hydrothermal alteration and degree of water saturation. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 107775. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2023.107775>.
- Klein, A., Jessop D. E., Donnadiou F., Pierre J., Moretti R. (2024, sous presse). Dome permeability and fluid circulation at La Soufrière de Guadeloupe implied from soil CO₂ degassing, thermal flux and self-potential", *Bulletin of Volcanology*.
- Kereszturi, G., Heap, M. J., Schaefer, L.N., Darmawan, H., Deegan, F.M., Kennedy, B., Komorowski, J.-C., Mead, S., Rosas-Carbajal, M., Ryan, A., Troll, V.R., Villeneuve, M., & Walter, T.R. (2023). Porosity, strength, and alteration – Towards a new volcano stability assessment tool using VNIR-SWIR reflectance spectroscopy. *Earth and Planetary Science Letters*, 602, 117929.
- Pantobe L., Burtin A., Chanard K., Komorowski J.-C. (2024) Evolution of shallow volcanic seismicity in the hydrothermal system of La Soufrière de Guadeloupe following the April 2018 M_l 4.1 earthquake. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 447, <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2023.107989>.
- Rave-Bonilla, Y.P., Jessop, D.E., Moune, S., Garbin, C., Moretti, R. (2023) Numerical modelling of the volcanic plume dispersion from the hydrothermal system of La Soufrière de Guadeloupe. *Volcanica*, 6 (2), pp. 459-477. Doi: 10.30909/vol.06.02.459477
- Metcalf A., Moune S., Moretti R., Komorowski J.-C, Aubry, T.J. (2023) Volatile emissions from past eruptions at La Soufrière de Guadeloupe (Lesser Antilles): Insights into degassing processes and atmospheric impacts. *Frontiers, Women in Sciences*, 11, doi:10.3389/feart.2023.1143325
- Metcalf A., Moune S., Komorowski J.-C, Robertson, R., Christopher, T.E., Joseph, E.P., Moretti R. (2023) Diverse magma storage and major and volatile magma composition: What are the implications on the eruptive style across a volcanic arc? An example of the Lesser Antilles Arc. *Earth-Science Reviews*, 241, 104440.
- Inostroza M., Moune S., Moretti R., Burkel, P., Chilin-Eusebe E., Dessert, C., Robert V., Gorge C. (2023) Major and trace element emission rates in hydrothermal plumes in a tropical environment. The case of La Soufrière de Guadeloupe volcano. *Chemical Geology*, 632, 121552.

Conférences

- Corbeau J., Saurel J-M, Vlastelic I., Deroussi S., Beauducel F., Satriano C., Retailleau L., Burtin, A., Komorowski J-C., de Chabalière J-B., Carazzo, G., Aubaud, C., Vallée, M., Lemarchand, A., the OVSM Team1 and the OVSG Team3. De l'alarme au recueil des témoignages : itinéraire d'un séisme ressenti dans les observatoires Français des Petites Antilles. 11^e Colloque national de l'Association Française du Génie Parasismique (AFPS), article AFPS202300059, Guadeloupe, 2023.
- Corbeau J., Vlastelic I., Burtin A., Saurel J-M., Komorowski J-C., Lemarchand A., Bazin S., Clouard V., Feuillet N., Fontaine F. R., Lejeune A-M., de Chabalière J-B., Beauducel F., Carazzo G., Aubaud C., Melezan D., Jadelus F., Vidal C., Lavenaire, A., Pottier A., Andrieu A., Fernandez I., Bouin M-P., Satriano C., Vallée M., Le Friant A. and OVSM team. Retour sur 20 ans de sismicité enregistrée en Martinique. 11^e Colloque national de l'Association Française du Génie Parasismique (AFPS), article AFPS202300058, Guadeloupe, 2023.
- Vlastelic I., Beauducel F., Burtin A., Corbeau J., de Chabalière J.B., Dessert C., Komorowski J.C., Moretti R., Saurel J.M., Lemarchand A., Ucciani G., Sakic P., Ajax J., Berthod C., Bosson A., Chilin-Eusebe E., Deroussi S., Kitou T., Lambert C., Novar J., Pierre J., Bouin M-P., Satriano C., Vallée M., Pantobe L. L'Observatoire Volcanologique et Sismologique de Guadeloupe (IPGP) : Missions, réseaux et bilan de l'activité sismique régionale. 11^e Colloque national de l'Association Française du Génie Parasismique (AFPS), article AFPS202300049, Guadeloupe, 2023.



7. Autres activités

> Relation avec la préfecture et le SIDPC

23 Mars 2023 : Exercice Carib Wave 2023, organisé par le SIDPC, Centre Opérationnel Départemental (COD), préfecture de Basse -Terre

13 Juin : Réunion de crise avec le SIDPC pour gérer l'emballement médiatique provoqué par la parution dans Guadeloupe première d'un article alarmiste sur la Soufrière (13 Juin)

26 Juin : Visite de M. Le Préfet, Xavier le Fort, à L'OVSG

10 Aout 2023 : Accompagnement du M. Le Préfet, Xavier le Fort, au sommet de la Soufrière, dans le but de mettre à jour l'arrêté préfectoral réglementant l'accès à la zone active (10 Aout 2023)

11 Septembre : Visite de M. Le Directeur de cabinet, M. Franck Dorge à L'OVSG

13 Septembre : Réunion avec M. Le Préfet, Xavier le Fort, M Le Directeur de cabinet, Franck Dorge et Mme Allamelle-Bernard cheffe du SIDPC dans le cadre de la modification de l'arrêté réglementant l'accès au sommet de la Soufrière

9 Octobre : Réunion préfecture avec le SIDPC et les services concernées (PNG, SDIS, Gendarmerie, Maires) par le projet de modification de l'arrêté réglementant l'accès au sommet de la Soufrière

16 Octobre : Réunion préfecture avec le SIDPC, Fabrice DOLOIR, (Président Section Guadeloupe, Syndicat National des Accompagnateurs en Montagne) et les services concernées (PNG, SDIS, Gendarmerie, Maires), par le projet de modification de l'arrêté réglementant l'accès au sommet de la Soufrière

1° Décembre : Visite M. Hallade, conseiller diplomatique du préfet de la région Guadeloupe

> Relation avec le Conseil Départemental

6 Mars 2023 : Comité de liaison OVSG-IPGP — Conseil Départemental. Hôtel du département, Basse-Terre.

7 Mars 2023 : Visite de Florus NESTAR, Directeur Général des Services, et de Richard ALBINA, à l'OVSG.

20 Décembre 2023 : Réunion de la direction de l'OVSG avec la Direction Générale des Services (Florus NESTAR ; Richard ALBINA), Danielle Minatchy, Marlène Dorville à l'Hôtel du département, Basse-Terre

> Relation avec l'Université des Antilles

Participation aux Conseils d'Administrations et aux Conseils du Pôle Guadeloupe

6 Novembre 2023 : Réunion avec la présidence de l'Université, Marie-Lise Bernard, Mendy Bengoubou-Valerius au sujet de la nouvelle Direction de la Recherche et de la Valorisation (DirReV)



> Autres relations

15 juin : Entretien avec le Monsieur André ATALLAH, maire de la ville de Basse-Terre, mairie de Basse-Terre (Réactivation de la Soufrière et développement de la ville de Basse Terre)

22 mai : Rencontre avec une délégation CNRS (Alain SCHUHL, DGDS CNRS & DSR Outre-mer, Anne RENAULT, Chargé de mission Outre-mer auprès du PDG du CNRS, Jean-Raphaël Gros-Désormeaux, adjoint au Directeur scientifique référent Outre-mer du CNRS) dans le cadre du dispositif DSR-ADSR visant à renforcer la présence du CNRS en Outre-Mer. Rectorat de Guadeloupe.

29 Septembre : Participation au Comité Régional de Programmation (CRP) des activités d'appui aux politiques publiques 2024 du BRGM (DEAL, site de Dothémare)

02 octobre : Visite du général Vincent Lamballe, commandant la gendarmerie de Guadeloupe

24 novembre : Visite SOMOGYI, Norbert, conseiller scientifique, Ambassade de Hongrie

12 Octobre : Visite délégation MAPPPROM (Camille DAGORNE, directrice de cabinet à la Direction générale des outre-mer, Claire DAGUSE, cheffe de la MAPPPROM et de Mathilde Risède responsable PSA au sein de la MAPPPROM) accompagnée de Mme Allamelle-Bernard cheffe du SIDPC

14 Novembre : Visite Julien Rey, chargé de mission au sein de la Direction générale de la prévention des risques (DGPR), accompagné d'une délégation de la DEAL composée de Catherine Perrais (directrice adjointe), Thierry Lecomte (chef du service Risques, Énergie, Déchets), Aude Comte (Cheffe du pôle Risques Naturels, Service Risques Énergie Déchets), Léa Garandau (cheffe de la mission appui à la gestion de crise), et Charlotte Terrac (cheffe de l'unité plan séisme Antilles)

> Formations, communications grand public

30 janvier – 3 février : Accueil à l'observatoire de 2 élèves collégiens en classe de 3^e pour un stage d'observation

16 mai 2023 : Animation d'une conférence « 7 idées reçues sur le risque sismique aux Antilles » dans le cadre des journées japonaises, Mémorial Acte, Pointe à Pitre.

23 et 24 mai 2023 : Participation à la table ronde "la science dans la société guadeloupéenne, les apports de la science dans notre territoire : les grands enjeux" dans le cadre du colloque Sciences, Ecole et Société, organisé par le rectorat de l'académie de la Guadeloupe sur le site de l'Université des Antilles.

16 Aout 2023 : Ouverture de l'observatoire à une quinzaine de collégiens et lycéens du centre de vacances de la Police localisé au Raizet, présentation des missions de l'observatoire, et des risques telluriques dans la Caraïbe.

21 Aout 2023 : Contribution à l'écriture du guide de prévention du risque sismique en entreprise pour la Guadeloupe et la Martinique, Direction Régionale de l'Economie, de l'Emploi, du Travail et des Solidarités (DEETS). Nicolas FRANCIUS, ingénieur de prévention au sein de la DEETS Guadeloupe.

12 septembre 2023 : Porte ouvertes de l'OVSG lors de la journée internationale de la résilience pour la réduction des risques de catastrophes

13 septembre 2023 : Introduction à la sismicité des petites Antilles, Séminaire des Maires, réalisé dans le cadre du Plan Séismes Antilles, Mémorial ACTe, Pointe-à-Pitre.

7 Novembre 2023 : Participation à une table ronde sur le risque volcanique aux Antilles, dans le cadre du « village de la culture du risque & de la résilience face aux risques majeurs », semaine Sismik 2023, CWTC Jarry, Guadeloupe.



7-11 Novembre 2023 : Participation à la réalisation de l'affiche « 7 idées sur le risque sismique en Guadeloupe » réalisée par la DEAL dans le cadre de la semaine Sismik 2023

4 Décembre 2023 : Ouverture de l'OVSG à la Chambre régionale des comptes de Guadeloupe, de Guyane, et de Martinique (présentation de l'observatoire et visite à 21 personnes)

12 Décembre 2023 : Formation théorique et pratique des Accompagnateurs en Montagne de Guadeloupe (AMM) aux aléas rencontrés sur le volcan de la Soufrière de Guadeloupe (demande formulée par l'AMM dans le cadre de la mise à jour de l'arrêté préfectoral réglementant l'accès au sommet du volcan)

> Interventions dans les médias

20 janvier 2023 : Intervention télévisée (Guadeloupe la 1er) et radiodiffusée (Radio Caraïbes Internationale) au sujet du séisme de magnitude 5.8 survenu le 20 janvier 2023 proche des cotes de Guadeloupe et très largement ressenti dans l'archipel.

23-25 mai : Participation au tournage du film documentaire « Volcans : menace sur la France » réalisé par Olivier Lacaze et diffusé pour la première fois le 5 Octobre 2023 sur la chaîne RMC découverte.

6 juin 2023 : Entretien Guadeloupe première/Franceinfos sur l'activité de la Soufrière de Guadeloupe (<https://la1ere.francetvinfo.fr/guadeloupe/sous-surveillance-permanente-la-soufriere-montre-des-signes-de-regain-d-activite-1403318.html>)

16 Octobre 2023 : Participation au podcast « Vivre au pied d'un volcan : la Soufrière », Journaliste Cécile Rémusat, AFP, Diffusé le 28/11/2023, Durée :19 minutes (<https://la1ere.francetvinfo.fr/vivre-au-pied-d-un-volcan-partez-a-la-decouverte-de-la-soufriere-en-guadeloupe-1440158.html>); <https://la1ere.francetvinfo.fr/programme-audio/vivre-au-pied-dun-volcan-f7820559-a780-479f-ba31-eee427894c59/>)

15 – 22 Novembre 2023 : Tournage du film MAGMA (production société Darius Films, société Dharamsala) : Conseil scientifique avant le tournage (scénario), assistance technique et logistique pendant le tournage.

4 Décembre 2023: Interventions radiodiffusées (Guadeloupe la 1^{er} et Radio Caraïbes Internationale) au sujet du séisme de magnitude 6.0 survenu le 2 Décembre 2023 au nord de la Désirade et très largement ressenti dans l'archipel de Guadeloupe, et plus largement dans les Antilles.

> Réseaux sociaux

Les communiqués exceptionnels, établis lors de séismes tectoniques ressentis et de séquences de séismes dans la zone de la Soufrière, sont transmis aux autorités ainsi qu'aux médias. Ils sont également publiés sur les réseaux sociaux par le biais d'une page Facebook. Cette page est suivie par 3619 personnes ou organisations (+ 395 en 2023).

Ainsi, au cours de l'année 2023, 24 publications ont été publiées sur Facebook. Cela représente une couverture de 18228 personnes.

Le communiqué pour les deux séismes du 1^{er} et 2 décembre (M = 5.2 et 6) est la publication qui a touché le plus de personnes. En effet, 4324 personnes ont consulté cette publication. La couverture de cette publication est supérieure de 568 % à la couverture médiane de notre publication (647 personnes) sur Facebook. Notons également que la séquence de séismes dans la zone de la Soufrière du mois d'avril (étoile rouge sur la figure 50) a été fortement suivie par la population.

Enfin, deux autres publications, qui présentent le bulletin mensuel du mois de mai et présente la sortie au sommet pour le nettoyage de la Soufrière, montrent que la population est attentive à la vie de l'Observatoire et à la surveillance de la Soufrière.

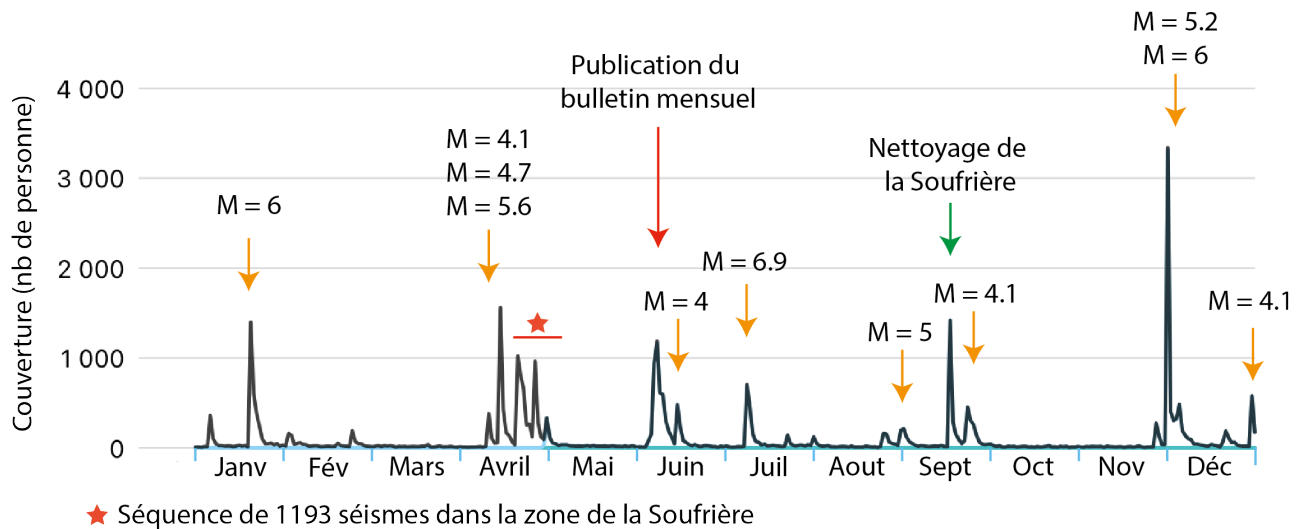


Figure 50 : Couverture de la page Facebook de l'Observatoire Volcanologique et Sismologique de Guadeloupe en 2023 associée aux différents séismes ressentis par la population.

> Visiteurs et missionnaires

- 9 Mars – 9 Juin : Lilian Hebrard (Stage Master 2 Recherche IPGP, direction A. Burtin, sujet : Localisation de signaux sismiques de type trémor harmonique à la Soufrière de Guadeloupe)
- 12 – 19 Mars : P. Sakic (IPGP). Mission de travail sur réseau GNSS.
- 15 – 28 Mars : M. Diament et collaborateurs (IPGP). Mission Gravi dans le cadre du projet ANR MegaMu.
- 20 Mars – 26 Mai : Titouan Wendling (Stage Master 1 Recherche IPGP, direction I. Vlastelic, sujet Études sur la chimie des eaux des sources thermales de La Soufrière).
- 20 – 23 Mars : Mission de l'équipe du RAP pour la qualification des sites (implication T. Kitou)
- 8 – 14 Avril 2023 : Stephan Shuster, F. Costa, M. Benedetti (prélèvements microbiologiques)
- 10 – 14 Avril 2023 : J.-M. Saurel et Lise Retailleau (mise en place sur les serveurs de l'OVSG du code PHASEWORM pour la détection, classification, et localisation automatique des séismes par machine learning)
- 11 – 18 Avril 2023 : Magalie Bonifacie (IPGP). Prélèvement de gaz, condensats et lac Tarissan.
- 14 Avril – 9 Mai 2023 : F. Donnadiou, D. Jessop, A. Klein (Laboratoire Magmas et Volcans). Mesures PS, flux de chaleur, et flux CO₂.
- 3 – 24 Mai 2023 : J.-B. de Chabalière (IPGP). Mission GNSS répétition.
- 15 – 27 Mai 2023 : M. Heap et collaborateurs (EOST). Projet ANR Mygale. Propriétés mécaniques des roches.
- 19 Mai : Melody Philippon (UA) ; Jean-Frederic Lebrun (UA) : Réunion au sujet des relations entre l'OVSG et le département de géologie de l'Université des Antilles
- 7 – 9 Juin 2023 : Visite étudiants EOST (15 Licence 3) encadrés par D. Lemarchand et M Ulrich. Visite OVSG et Terrain.



- 10 – 24 Juin 2023 : Visite Anthony Potier (OVSM). Déploiement du sondeur multi-faisceaux (PREST) pour cartographier les embouchures des rivières en Guadeloupe (Capesterre).
- 1 – 28 Juillet : 3 Stagiaires EOST (Clara Willmes; Emma Gambart; Aurore Jules). Tuteur S. Deroussi. Sujet : S'initier aux différentes techniques mises en oeuvre par l'OVSG pour surveiller l'activité du volcan de la Soufrière et la sismicité régionale de l'arc des Petites Antilles.
- 27 Septembre : Equipe ERT – Sismo du projet ANR Megamu : A Rosseli (Directeur générale GEG Experts : Géophysique Environnement Géotechnique) ; Catherine Truffert (Présidente - IRIS Instruments) ; Filippo Barsuglia (GEG Experts)
- 13 – 30 Novembre : Laëtitia Pantobe, 3^e année de thèse, Direction A. Burtin, J.-C. Komorowski, K. Chanard
- 4 Décembre 2023 : Jean Verlin maître de conférences en sociologie politique à l'Université Jean Moulin Lyon ; l'histoire et le fonctionnement des observatoires volcanologiques et sismologiques
- 12 Décembre 2023 – 12 Janvier 2024 : S. Moune, D. Jessop, A. Klein (Laboratoire Magmas et Volcans) et M. Bontemps (OPGC). Mission de travail dans le cadre des tâches d'observations : MultiGas, drone, thermique Soufrière.
- 17 – 25 Décembre : François Beauducel, Formation WebObs initiale, formation WebObs avancée, interventions sur fonctions spécifiques WebObs (Multigaz, Shakemap), sortie sur la Soufrière pour faire le point sur les transformations.

> Vie de l'observatoire

- 21 décembre 2023 : Repas de Noël en présence d'anciens membres de l'observatoire (Fig. 51)



Figure 51 : De gauche à droite : Joanny Pierre, Christian Lambert, Julien Novar, Carole Berthod, Thierry Kitou, Jolaine Ajax, David Jessop, Imen Defferrard, Sebastien Deroussi, Séverine Moune, Christian Anténor-Habazac, Alexis Bosson, Ivan Vlastélic, Bertrand Figaro et son épouse, Céline Dessert, François Beauducel (absents : Elodie Chilin-Eusebe, Christian Moanda, Gilbert Hammouya)