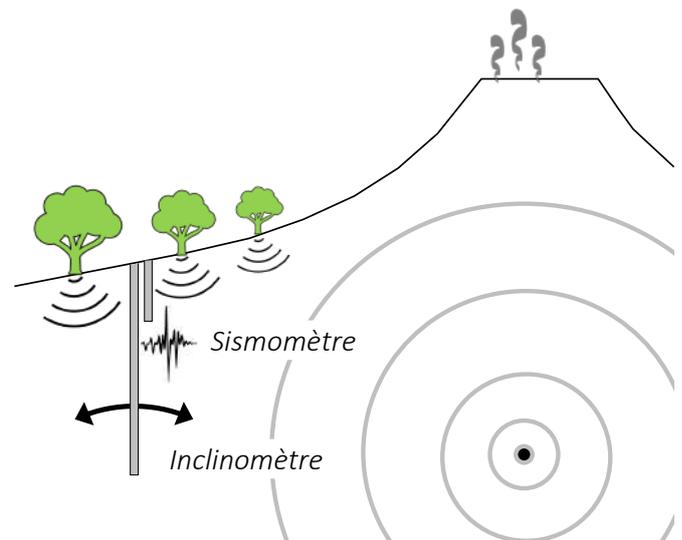


# Rapport annuel 2024

## Observatoire volcanologique et sismologique de Guadeloupe - IPGP





### > Couverture

Synoptique d'une station en forage multi-instrumentée à bas bruit de fond. Deux forages ont été instrumentés en 2024 au Sud (site de Parnasse) et Sud-Est (site de Savane l'Etang) du massif de la Soufrière. Ces stations accueillent un sismomètre large bande au fond d'un puits de 10m, des inclinomètres, des capteurs de pression, de température et de conductivité au fond d'un puits de 50m, ainsi qu'une station GNSS et une station météorologique en surface. Ce projet est réalisé dans le cadre d'une convention avec le Ministère de la Transition Ecologique et de la Cohésion des Territoires (MTECT).

### > Citation de ce rapport

Rapport annuel d'activité de l'Observatoire Volcanologique et Sismologique de Guadeloupe – synthèse 2024, Institut de Physique du Globe de Paris, décembre 2024.

### > 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 direction du Parc National de Guadeloupe et aux agents du secteur Soufrière pour leur collaboration et aide régulière sur le terrain.



## Sommaire

Résumé .....	5
<b>1. Présentation de l'observatoire .....</b>	<b>7</b>
> Historique et missions .....	7
> Fonctionnement et organigramme.....	8
> Personnel .....	10
<b>2. Activité de La Soufrière de Guadeloupe .....</b>	<b>13</b>
> Contexte .....	13
> Sismicité volcanique .....	15
> Déformation .....	20
> Activité fumerolienne et chimie des gaz .....	24
> Lac acide du Gouffre Tarissan .....	33
> Sources thermales.....	35
> Météorologie au sommet .....	38
<b>3. Activité tellurique régionale .....</b>	<b>38</b>
> Contexte .....	38
> Sismicité régionale .....	39
> Sismicité dans la zone des Saintes .....	41
<b>4. Réseaux de mesure.....</b>	<b>43</b>
> Réseau sismologique .....	43
> Réseau géodésie et extensométrie .....	47
> Réseau géochimique.....	50
> Réseau thermique et flux de CO <sub>2</sub> .....	53
> Réseau météorologique .....	53
> Projet de forages instrumentés.....	54
<b>5. Acquisition, traitement, visualisation, archivage et partage des données.....</b>	<b>55</b>
> Acquisition, traitements et archivages des données sismologiques.....	55
> Les laboratoires de chimie des eaux et des gaz .....	55
> L'infrastructure informatique .....	56
> Système WebObs pour la recherche et la surveillance scientifique .....	56



<b>6. Recherche et collaborations</b> .....	<b>57</b>
> Projets de recherche ANR .....	57
> Autres projets et résultats scientifiques .....	62
> Publications .....	68
> Thèses soutenues.....	68
> Conférences .....	69
>	
<b>7. Autres activités</b> .....	<b>69</b>
> Relation avec la préfecture et le SIDPC .....	69
> Relation avec le Conseil Départemental.....	69
> Relation avec l'Université des Antilles .....	70
> Comités Scientifiques .....	70
> Relations avec les autres institutions.....	70
> Formations, communications grand public .....	71
> Interventions dans les médias .....	71
> Réseaux sociaux.....	71
> Stagiaires .....	72
> Visiteurs et missionnaires .....	73
> Hygiène et sécurité .....	73
> Vie de l'observatoire .....	75



## Résumé

L'année 2024 a été marquée par la consolidation de l'équipe OVSG-IPGP, avec le recrutement de Julien Novar comme ingénieur d'étude en instrumentation sur un support permanent CNRS, et la titularisation d'Elodie Chilin, ingénieure d'étude en analyse chimique CNRS. **Au 1/12/2024** l'équipe de l'OVSG-IPGP comptait **10 agents, dont 9 titulaires et un fonctionnaire-stagiaire**, avec **9.4 ETP** (Équivalent Temps Plein) affectés aux missions de l'OVSG, et 0.6 ETP affecté aux missions de l'ObsERA.

En 2024, l'OVSG-IPGP a poursuivi la fiabilisation, l'extension et la modernisation des réseaux de surveillance. L'observatoire a installé et **mis en service deux des trois stations sismiques multi-paramètres à bas bruit de fond** prévues dans le cadre d'une convention avec le Ministère de la Transition Ecologique (MTE). Ces stations installées dans des forages sur les flancs du volcan de La Soufrière produisent en temps réel des données de haute qualité qui renforcent les capacités de surveillance de l'observatoire. Également avec le soutien du MTE, l'observatoire a poursuivi la mise à jour en profondeur de ses serveurs informatiques, pour améliorer leur fiabilité et se munir 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. Le soutien du Service National d'Observatoire en Volcanologie (SNOV) de l'INSU-CNRS a permis de **maintenir au meilleur niveau opérationnel les équipements analytiques du laboratoire de chimie** (spectromètre de masse à source gazeuse et chromatographie ionique) et les instruments de mesure mobiles (analyseur multi-gaz portable, et analyseur du flux de CO<sub>2</sub> dans le sol), ainsi que de remplacer et **moderniser les composants des stations sismologiques et sécuriser l'alimentation en énergie** des stations distantes connectées par satellite. Sur le volcan, des campagnes de répétition des mesures de flux de CO<sub>2</sub> ont été mises en place, en complément des mesures répétées déjà inscrites dans le programme de surveillance (composition des gaz, des fluides hydrothermaux et des sources chaudes, réseau dense de stations GNSS, extensométrie des fractures).

La Guadeloupe et sa région ont connu en 2024 **une activité sismique soutenue** : l'OVSG-IPGP a enregistré plus de **7000 séismes volcaniques sous La Soufrière, dont une vingtaine d'essaims sismiques, et 1894 séismes tectoniques régionaux, dont 1165 (61.5%) ont pu être localisés**. La détection et la caractérisation des petits séismes ont été améliorés grâce à l'installation en forage de stations sismiques à bas bruit de fond (Savane l'Etang et Parnasse). Cette activité tellurique a été l'objet de **25 communiqués** relatifs à la sismicité volcanique mais seulement **7 communiqués relatifs** à des séismes tectoniques ressentis en Guadeloupe et dans les îles du Nord, ces derniers ayant été moins nombreux en 2024 comparés aux années précédentes (16 en 2022 et 13 en 2023). Les séismes tectoniques les plus importants se sont produits le 8 mai 2024 à 36 km au nord-nord-ouest de Anse-Bertrand à 17 km de profondeur (**M= 5.4**) et le 15 novembre 2024 à 163 km au nord de Anse-Bertrand à 38 km de profondeur (**M= 5.3**).

Le volcan de La Soufrière a montré en 2024 une activité hydrothermale toujours très soutenue et un régime globalement comparable à celui observé ces dernières années. On note cependant un rebond du régime sismique et de déformation après plusieurs années de baisse (2021-2023). Ce rebond s'est manifesté par (1) **une augmentation de 22% de l'énergie sismique libérée** par rapport à 2023 (2) **une hausse de la pression à l'intérieur du dôme** enregistrée par l'écartement des grandes fractures (en particulier la reprise de l'ouverture de la fracture Napoléon – 8 Juillet 1976) et l'accélération de l'ouverture du dôme vu par les stations GNSS. Plus précisément, **l'inflexion de régime s'est produite en milieu d'année 2024**, avec une activité volcano-tectonique et un régime de déformation nettement plus marqués en seconde partie d'année. La température de la fumerolle Cratère Sud Sud (CSS) s'est maintenue dans la **zone des 200°C** tout au long de l'année. Dans ce secteur le plus actif de La Soufrière, le déséquilibre entre le flux de chaleur profond et la quantité d'eau disponible dans le système hydrothermal perdure donc depuis 2023. Ce déséquilibre est entretenu par une **pluviométrie encore faible en 2024** au sommet de La Soufrière (**3741 mm** à la Station Piton Sanner). Plus à l'est et au nord du dôme, des phénomènes instables avec projections majeures de vapeurs et de particules solides se sont produits à l'évent Napoléon Est (le 9 Janvier) et au gouffre Tarissan (le 1<sup>er</sup> Octobre). Les températures et pression d'équilibre des gaz de la fumerolle Napoléon Nord ont poursuivi leur diminution, se rapprochant des conditions de surface. En accord avec les dernières tomographies électriques du dôme, cette évolution pourrait refléter un système hydrothermal en expansion, plus ouvert vers la surface dans la partie Nord et Est du dôme, où l'activité fumerolienne et l'anomalie thermique du sol se sont étendues et ont augmenté ces dix dernières années. Les sources thermales situées en altitude sur le flanc sud de la Soufrière ont poursuivi leur montée en température débutée il y a plus de 25 ans (**+0.74°C/an depuis 2018 à la source Galion**), 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 mis à jour l'arrêté réglementant



## Rapport annuel 2024

Observatoire volcanologique et sismologique de Guadeloupe - IPGP

l'accès aux zones actives, en instituant un **périmètre d'interdiction à l'intérieur du périmètre de sécurité** (arrêté n°2024-010/CAB/SIDPC du 02 mai 2024). Les concentrations des gaz dans l'air du sommet ( $\text{H}_2\text{S}^{\text{max}}$  entre 9 et 200 ppm et  $\text{SO}_2^{\text{max}}$  entre 1.6 et 55 ppm) restant bien **au-dessus des limites d'exposition professionnelle sur 8 heures et sur 15 minutes** (INRS), l'OVSG-IPGP a décidé d'équiper ses agents d'appareil de protection respiratoire plus protecteurs (masque facial intégral type 3M série 6000 équipé de filtres de classe 2).



## 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 étaient de 10 agents au 1/12/2024**, dont une enseignante-chercheuse, un chercheur, un gestionnaire et sept 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 termes 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 instrumentés, 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

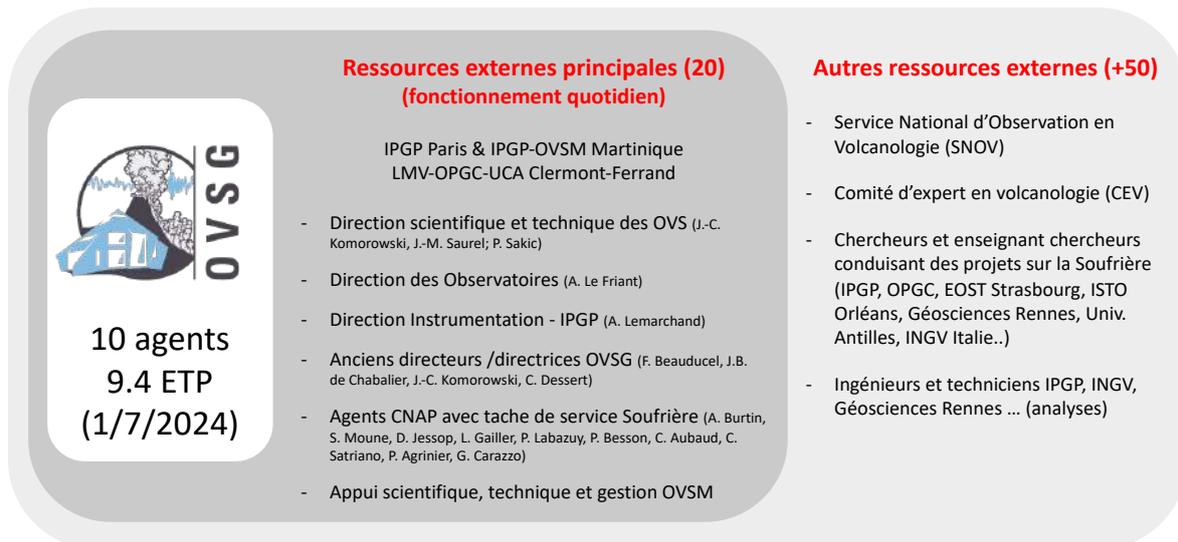


Figure 1. Ressources humaines internes (OVSG), externes et mobilisables en cas de besoin (expertise, analyse) ou de crise.

Du point de vue des ressources humaines, l'année 2024 a été marquée par le départ en Mars de Jolaine Ajax, technicienne en analyse chimique sur contrat (convention avec le Ministère de la Transition Écologique et de la Cohésion des Territoires, MTECT) et le recrutement en Décembre de Julien Novar, ingénieur en instrumentation jusqu'alors en CDD « gagé » CNRS, sur un support permanent CNRS d'ingénieur d'étude. Elodie Chilin-Eusebe, recrutée en décembre 2023 comme ingénieur d'étude CNRS a été titularisée le 1<sup>er</sup> décembre 2024. **Au 1/12/2024** l'équipe de l'OVSG comptait **10 agents, dont 9 titulaires et un fonctionnaire-stagiaire** (Julien Novar) (Fig. 2). Si l'on tient compte des implications de Thierry Kitou (20%), Elodie Chilin (20%) et Imen Defferrard (20%) dans les tâches de l'ObsERA, les moyens humains strictement impliqués dans le fonctionnement de l'OVSG représentent **9.4 ETP (Équivalent Temps Plein)**. Sur ces moyens, **0.37 ETP** est impliqué dans l'installation et la maintenance des stations sismologiques du Réseau Accélérométrique Permanent RAP (17% T. Kitou, 5% S. Deroussi, 5% P. Joanny, 5% A. Bosson, 5% J. Novar). L'OVSG bénéficie aussi des services d'un gardien (Christian Moanda) rémunéré par le Conseil Départemental. L'engagement de l'équipe de l'OVSG a été reconnue par **le changement de grade (TCS) de Imen Defferrard** et **le changement de corps (IR) de Sébastien Deroussi** (changements effectifs en 2025).



## Organigramme 2025 de l'Observatoire Volcanologique et Sismologique de Guadeloupe

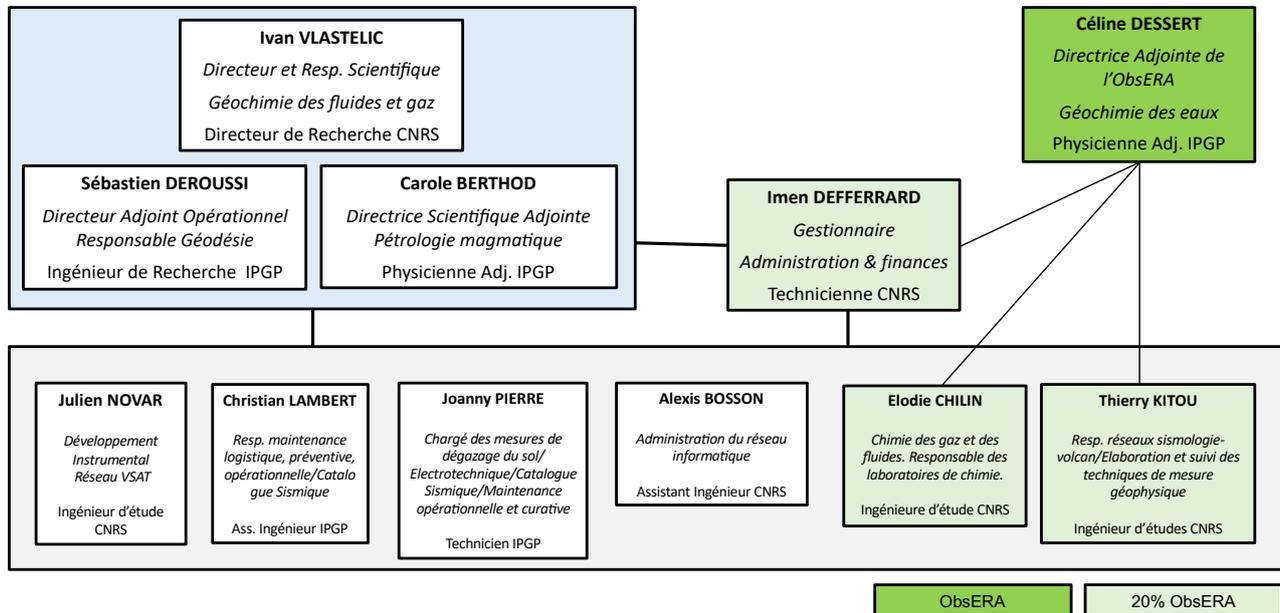


Figure 2. Organigramme et photo de l'équipe 2024 de l'OVSG. De gauche à droite : Julien Novar, Sébastien Deroussi, Joanny Pierre, Elodie Chilin-Eusebe, Carole Berthod, Jolaine Ajax (départ en mars 2024), Thierry Kitou, Christian Lambert, Imen Defferrard, Ivan Vlastelic (absent : Alexis Bosson)



> Personnels OVSG sur site

Prénom NOM	Fonction
<b>Equipe scientifique</b>	
Carole BERTHOD	PHAD – Pétrologie magmatique
Ivan VLASTELIC	DR CNRS – Directeur et responsable scientifique – Géochimie
<b>Equipe technique</b>	
Jolaine AJAX**	TECH IPGP (Convention MTE, Physico-chimie des fluides, départ en mars 2024)
Alexis BOSSON	AI CNRS – Responsable informatique et administrateur système
Elodie CHILIN-EUSEBE*	IE CNRS – Physico-chimie des fluides
Imen DEFFERRARD*	TECH CNRS Gestionnaire
Sébastien DEROUSSI	IE IPGP (IR en 2025) - 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 – 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%	

> 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



**Rapport annuel 2024**  
Observatoire volcanologique et sismologique de Guadeloupe - IPGP

Magali BONIFACIE	DR CNRS - géochimie des isotopes du chlore des fluides de la Soufrière
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 - analyses ICPMS
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-OVPM, 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
Jérôme VERGNE	PHY, directeur OVSM

PHY : Physicien ; PHAD : Physicien-Adjoint ; DR : Directeur de recherches ; CR : Chargé de recherches ; MC : Maitre 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
Amélie KLEIN	Soil CO <sub>2</sub> flux, thermal flux and self-potential at la Soufrière de Guadeloupe: implications for changing patterns of fluid motion within the dome (Direction F. Donnadiou, D. Jessop). Thèse de l'Université Clermont-Auvergne, soutenue le 29 Novembre 2024.
Olivier GILLET	Modélisation et simulation des évacuations de la population basse-terrienne lors d'une crise éruptive de La Soufrière de Guadeloupe (Direction E. Daudé ; J.-C. Komorowski) Thèse de l'Université de Rouen, soutenue le 8 Février 2024.
Laëticia PANTOBE	Identification et modélisation des processus physiques de déclenchement et modulation de la sismicité volcanique : applications à la Soufrière de Guadeloupe (Dir. J-C Komorowski, A. Burtin, C. Chanard). Thèse de l'Université Paris Cité - Institut de physique du globe de Paris soutenue le 19 Décembre 2024.
Lisa CORROTTI	Variabilité de styles éruptifs au cours des dernières éruptions à La Soufrière de Guadeloupe (Direction : Lucia Gurioli, Jean-Christophe Komorowski, Carole Berthod). Thèse de l'Université Clermont-Auvergne débutée en octobre 2024.



## 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<sup>e</sup> siècle (1530 ± 30 ans ; Komorowski et al., 2008) a conduit dans sa phase finale à la formation du dôme actuel. Les reconstitutions et modélisations récentes montrent qu'elle a commencé par un écroulement partiel du flanc du volcan avec une avalanche de débris qui a atteint la mer au niveau de Basse-Terre. Il a été suivi d'une explosion plinienne modérée avec une colonne de gaz et de particules solides atteignant 10-12 km d'altitude, des retombées de ponces atteignant environ 6 cm d'épaisseur à Saint-Claude, et des coulées pyroclastiques dans les vallées radiales jusqu'à des distances de 5-6 km du dôme. L'éruption s'est terminée par la construction du dôme actuel de la Soufrière associée à la mise en place de coulées pyroclastiques dans les vallées radiales. Depuis, les éruptions qui se sont produites ont été uniquement phréatiques impliquant une décompression explosive du système hydrothermal et l'éjection de matériaux anciens du volcan sans apport de magma nouveau. Ces éruptions ont été majeures en 1797-98, 1836-37 et 1976-77 et mineures en 1690, 1809-1812, et 1956. Les phénomènes associés à l'activité non-magmatique dite phréatique incluent des explosions verticales et latéralement dirigées, des retombées de cendres et de blocs, des écoulements pyroclastiques non-magmatiques, des coulées de boue, du dégazage acide pouvant contaminer l'environnement. Les éruptions non-magmatiques majeures peuvent également engendrer des effondrements partiels de l'édifice et la mise en place d'avalanche de débris sur quelques kilomètres de distance. 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). L'apparition d'une nouvelle fumerolle nommée Napoléon Est en février 2016 (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.



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.



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 issu 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. **Cet arrêté a été mis à jour le 02 mai 2024 (n°2024-010/CAB/SIDPC) en instituant un périmètre d'interdiction à l'intérieur du périmètre de sécurité (Fig. 4) Le périmètre d'interdiction est un espace interdit à tous à l'exception des personnes exerçant des missions de secours, de prévention des risques environnementaux et des scientifiques.**

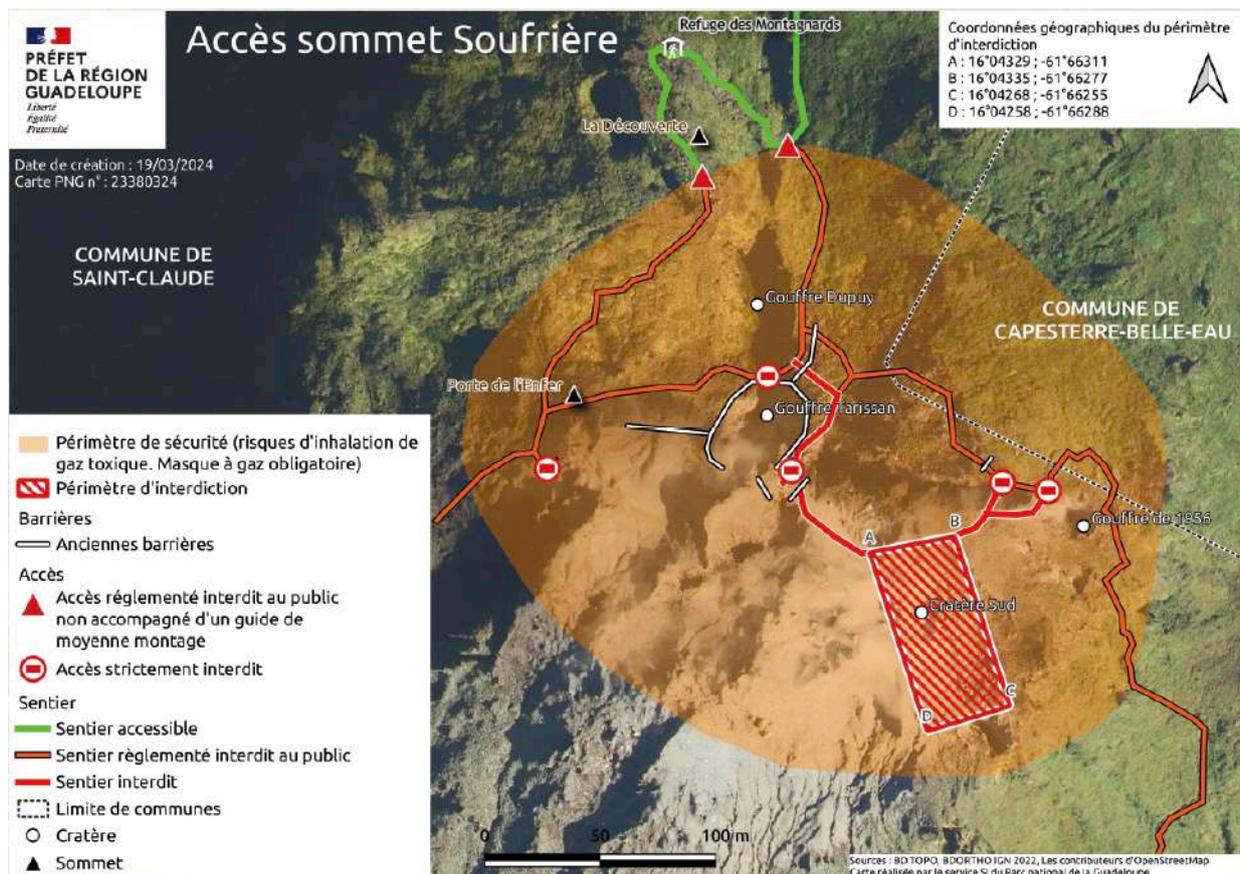


Figure 4. Carte de la réglementation d'accès à la Soufrière mise à jour le 02 mai 2024 par l'arrêté préfectoral n°2024-010/CAB/SIDPC.



## > Sismicité volcanique

### 1) Bruit sismique superficiel (hum)

Le bruit sismique (hum) visible dans la bande [3-5] Hz est produit par la circulation de fluide dans le système hydrothermal superficiel. Le réseau dense de sismomètres installé temporairement en 2017 (A. Burtin) a permis de localiser sa source principale à l'aplomb du Gouffre Tarissan, à moins de 200 m sous la surface, et une source secondaire qui part de la 1<sup>ère</sup> vers le Cratère Sud. Ces dernières années, les stations permanentes ont permis de suivre l'activité continue du hum, et ses variations d'amplitude qui témoignent de variations de l'activité. En 2024, des conditions météorologiques favorables (très bas bruit externe) ont permis de mettre en évidence une activité cyclique du hum sous forme de « drumbeat » (i.e. battement de tambour). L'inspection des traces sismiques passées a révélé que le signal en drumbeat est apparu de façon soudaine le 12 août 2023. L'analyse des signaux à l'aide de périodogrammes de Lomb-Scargle montre que le temps de retour du drumbeat varie entre 400 et 1000 secondes (Fig. 5). Selon l'étude en cours, le temps de retour du drumbeat est étroitement, mais de façon complexe, lié à la pluviométrie.

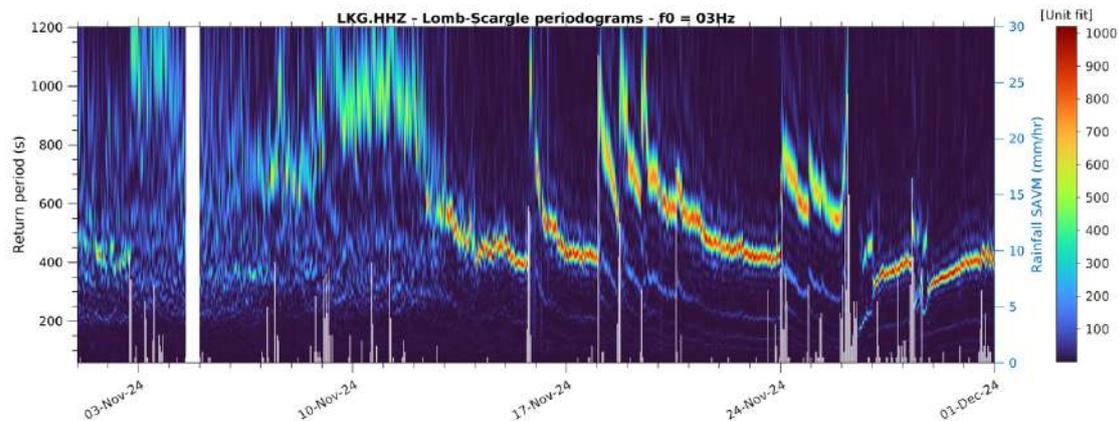


Figure 5. Périodogramme de Lomb-Scargle illustrant les variations de temps de retour du drumbeat en novembre 2024 (A. Burtin).

### 2) Répéteurs sismiques (0.5 à 1 km de profondeur)

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 (~88% en 2024). 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 2024 comptabilise 7034 séismes Volcano-Tectoniques (VT) (Fig. 6). Par comparaison, l'année 2023 comptait 4982 VT ce qui représente une augmentation d'environ 41 %. L'activité a été marquée par des essaims sismiques se succédant dans la première partie de l'année et elle s'est ensuite maintenue à un niveau de fond relativement important le reste de l'année (Fig. 6). Durant cette période, il y a eu peu d'essaims sismiques déclarés mais cela ne caractérise pas une absence d'activité.

Du point de vue énergétique, l'énergie sismique libérée en 2024 par les répéteurs correspond à un total de **22 MJ**. En 2023, l'énergie sismique libérée était de 18 MJ, ce qui correspond à une **augmentation de 22 %**. Pour mieux comprendre l'équivalence de cette valeur de 22 MJ, cela revient à l'énergie sismique libérée par un seul séisme de magnitude 1.7. La **magnitude maximale** observée pour les répéteurs sismiques a été d'une valeur de **1.2** lors d'un séisme ayant eu lieu le **7 juillet 2024**.



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, la classe d'événement VT-2 avait disparu du catalogue des détections. À l'époque du précédent rapport annuel, sa disparition pouvait être temporaire mais avec un nombre de détections de quelques dizaines d'événements en 2024 contre plus d'un millier les années précédentes, nous pouvons conclure à une **disparition permanente de la classe VT-2**.

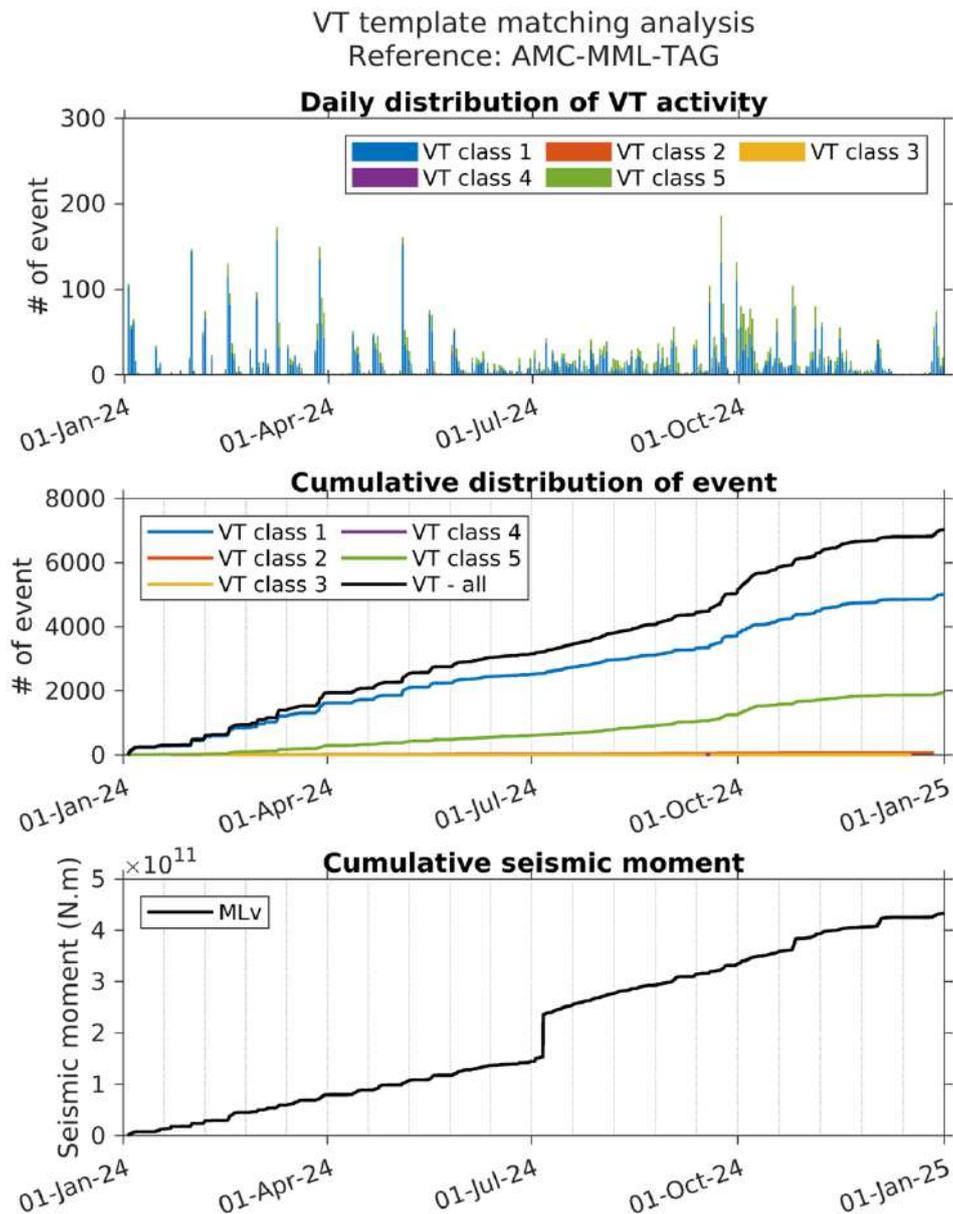


Figure 6. Bilan 2024 des répéteurs sismo-volcaniques à la Soufrière de Guadeloupe. (Haut) Distribution journalière du nombre de séismes Volcano-Tectoniques (VT) par classe de répéteur. (Milieu) Distribution cumulée du nombre de séismes VT par classe de répéteur et total (courbe noire). (Bas) Moment sismique cumulé au cours de l'année 2024 pour les VT détectés. Le moment sismique est proportionnel à l'énergie sismique libérée suivant la relation : Moment (N.m)  $\sim$  20000 x 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. 7). 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 **1351 séismes**, soit 19 % des détections, un pourcentage équivalent à l'année 2023.

### Hypocenter re-location of volcanic seismicity (2024.01.01-2024.12.31)

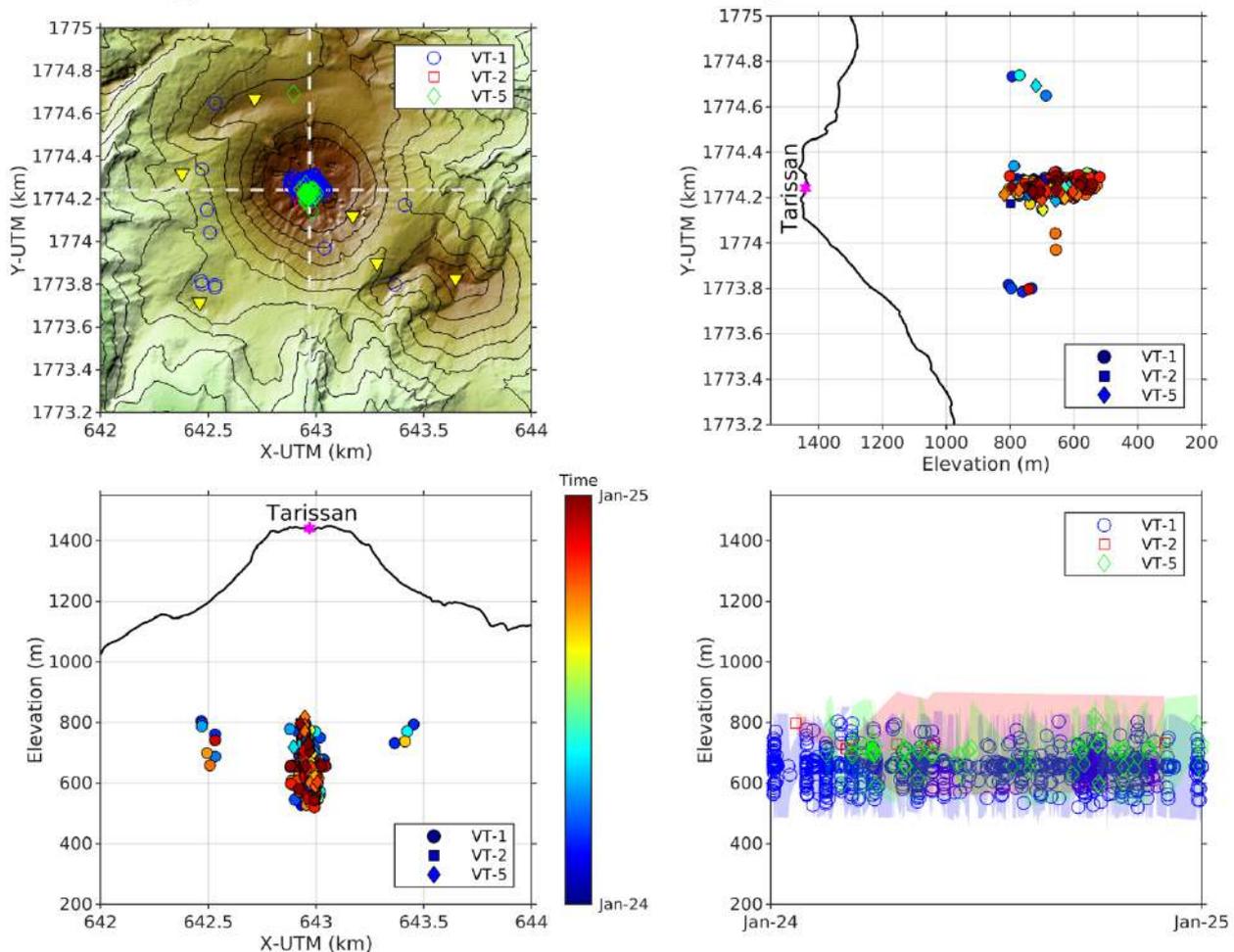


Figure 7. Localisation des répéteurs sismo-volcaniques (VT) à la Soufrière de Guadeloupe pour l'année 2024. Haut-gauche : Localisation des épencentres sur et autour du dôme de la Soufrière. Haut-droite : localisations des hypocentres projetées sur une coupe nord-sud passant par le Gouffre Tarissan. Bas-gauche : localisations des hypocentres projetées sur une coupe ouest-est passant par le Gouffre Tarissan. La couleur indique le temps au cours de l'année 2024. 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. 8). 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 2024, **la b-value moyenne est de 2.36** qui est une valeur classique pour une sismicité de système hydrothermal à faible profondeur (Fig. 8), et qui est **en hausse par rapport à 2023** (b-value de 1.89). Cela explique pourquoi en dépit d'un plus grand nombre d'événements le niveau d'énergie sismique libérée n'a pas beaucoup augmenté de 2023 à 2024.

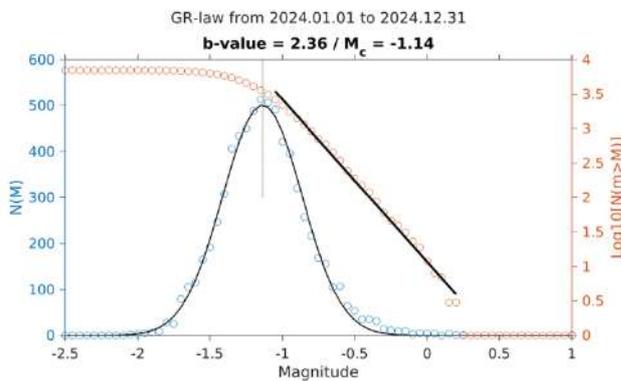


Figure 8: Relation de Gutenberg-Richter pour les séismes Volcano-Tectoniques (VT) de l'année 2024. La courbe bleue présente la distribution du nombre d'événements détectés par gamme de magnitude. La courbe rouge présente la distribution cumulée du nombre d'événements (en log décimal) supérieure à une magnitude donnée.

L'analyse temporelle de ce paramètre montre une variation dans une gamme allant de 1.5 à 3 (Fig. 9). 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.

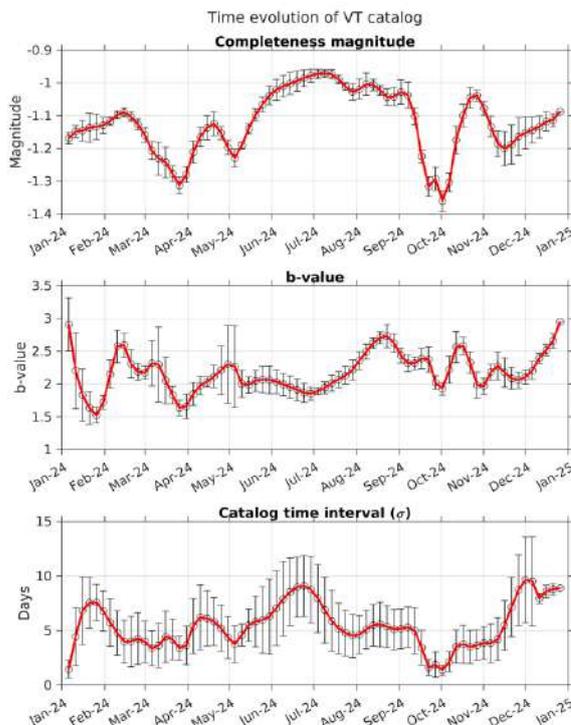


Figure 9: Évolution temporelle des paramètres du catalogue des séismes Volcano-Tectoniques (VT) issue de la relation de Gutenberg-Richter. (Haut) Magnitude de complétude indiquant la limite de détection instrumentale du réseau. (Milieu) b-value indiquant la décroissance linéaire du catalogue de sismicité volcanique. (Bas) Intervalle de temps représentatif de la valeur des paramètres de la relation de Gutenberg-Richter.



### 3) Sismicité volcano – tectonique à profondeur intermédiaire (1-3 km) et profonde (>3 km)

L'activité sismique à profondeur intermédiaire sous le massif de la Soufrière a été plus élevée en 2024 que les années précédentes, sans toutefois atteindre le niveau de l'année 2021. En particulier, une vingtaine de séismes de **magnitude comprise entre 0 et 1.4** se sont produits entre **0.9 et 3.3 km sous le sommet** (+0.5 à -1.9 km par rapport au niveau de la mer) entre **août et octobre 2024** (Fig. 10). Les épacentres sont localisés à moins de 1 km du dôme de la Soufrière. Cette activité a été précédée au mois de juin par deux séismes excentrés (4-6 km au Sud-Est du dôme), plus profonds (22 et 36 km sous le niveau de la mer) et de **magnitude 2.0 à 2.2**.

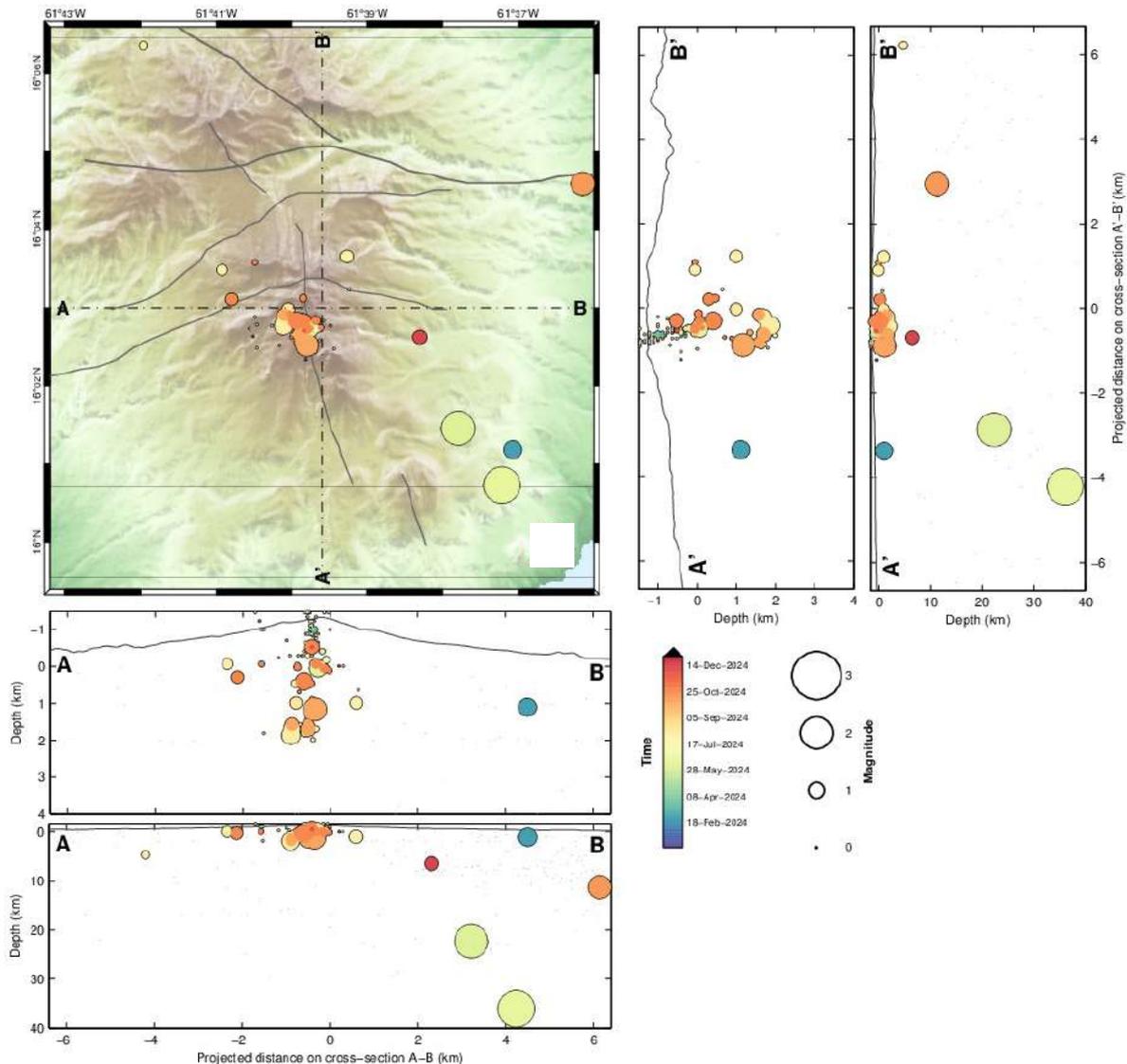


Figure 10. Carte des épacentres des séismes volcano-tectoniques s'étant produit en 2024 dans le secteur de la Soufrière de Guadeloupe (haut-gauche). Projection des hypocentres sur des coupes Nord-Sud (haut-droite) et Est-Ouest (bas-gauche) jusqu'à 4 et 40 km sous le niveau de la mer.

**En résumé**, on note une **activité volcano-tectonique plus marquée en seconde partie d'année 2024**, avec, chronologiquement, deux séismes profonds excentrés en juin ( $M_d = 2.0$  à  $2.2$ ), un séisme répéteur énergétique ( $M_{lv} = 1.2$ ) < 1 km sous sommet début juillet, et une vingtaine de séismes de magnitude 0 à 1.4, 0.9 à 3.3 km sous le sommet entre août et octobre.



> 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 ( $\leq 2$  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. 11 gauche) montrent une déformation horizontale radiale du sommet du volcan (entre **6.0** (F562) et **16.9 mm/an** (CRA2)), à laquelle se rajoute un mouvement vers le sud-ouest du flanc sud de la Soufrière (entre **7.3 et 9.4 mm/an** pour les sites BULG et F802).

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. 11 droite), s'inscrivent dans cette tendance, avec accélération de l'ouverture du sommet (entre **8.4** (PSA1) et **19.5 mm/an** (CRA2)) et du glissement du flanc sud (entre **9.4 et 13.3 mm/an** pour les sites BULG et F802).

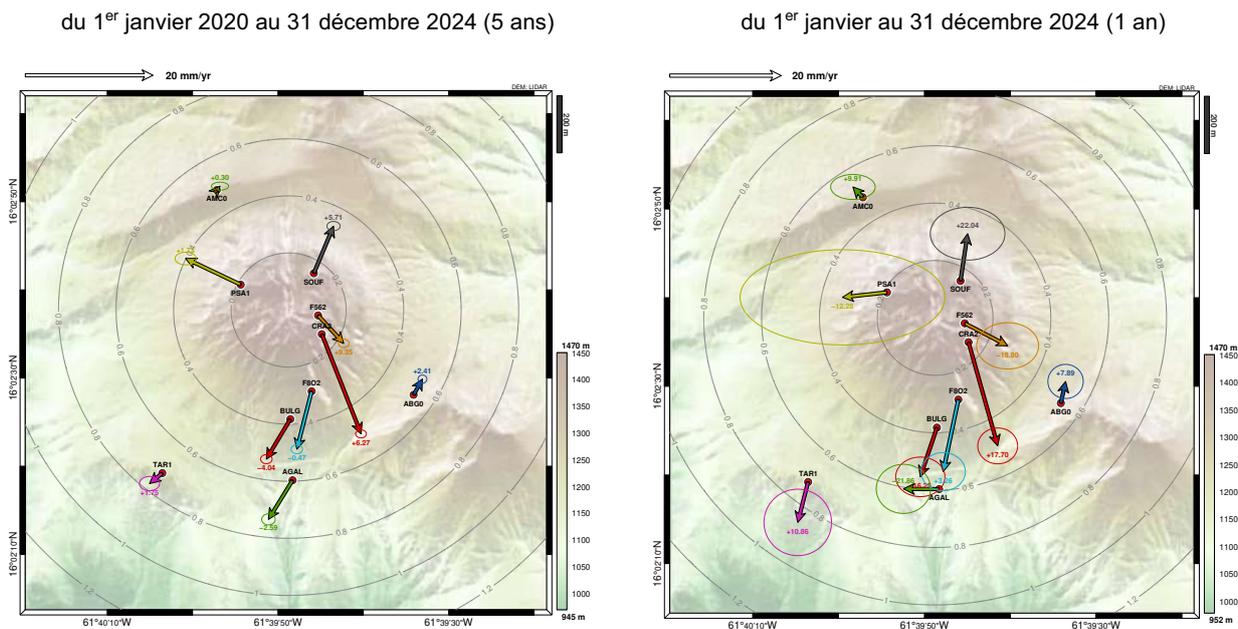


Figure 11. Déformation du dôme de la Soufrière enregistrée par le réseau GNSS permanent : moyennes sur 5 ans (gauche) et sur 1 an (droite). La taille de la flèche et la valeur indiquée en haut à gauche indiquent la vitesse horizontale moyenne en mm par an, mesurée sur une période de 5 ans ou 1 an. Le 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 distances entre stations GNSS permanentes (baselines) et leurs évolutions entre janvier 2019 et janvier 2025 sont rapportées sur la figure 12. Cette figure montre que 1) la **base du dôme est relativement statique** à l'exception du secteur sud-est (AGAL



– ABG0 – trait bleu) en ouverture. 2) Après un ralentissement début 2024, l'ouverture du sommet du dôme s'est accélérée en seconde partie d'année 2024 (cf distance SOU0-CRA2). Ce changement rapide du régime de déformation du sommet, à la baisse puis à la hausse, est également enregistré par l'écartement des grandes failles (voir section extensométrie). 3) En janvier 2025, la déformation du sommet du dôme semble se stabiliser sur la tendance moyenne observée depuis 2021.

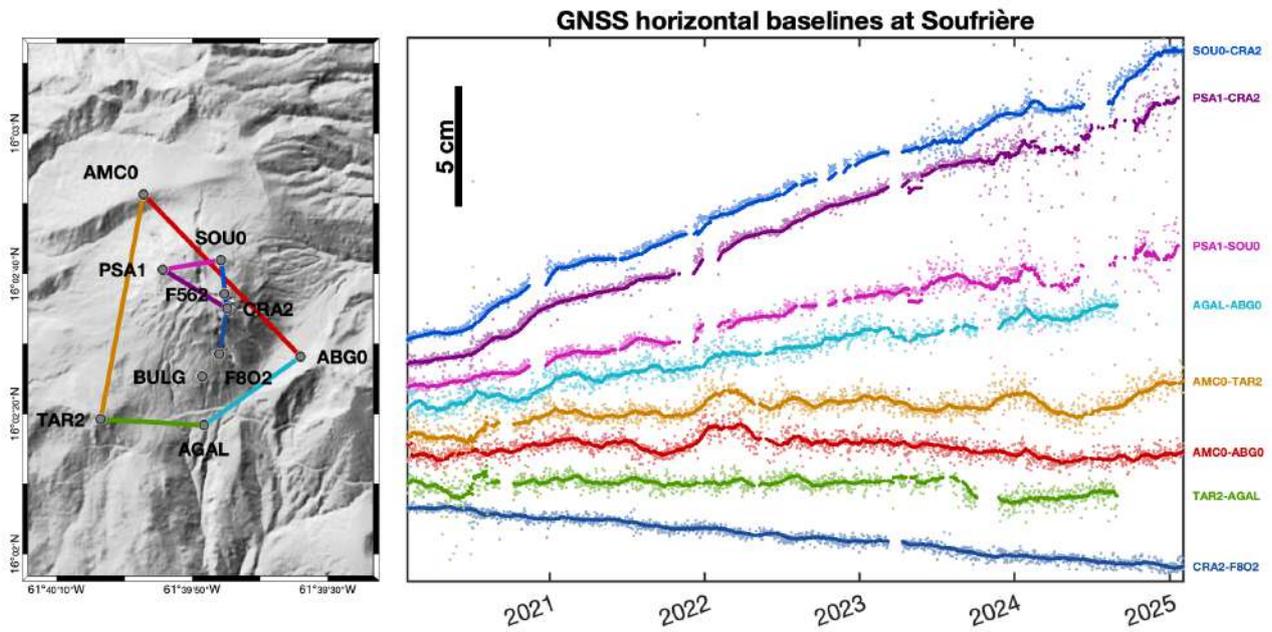


Figure 12. Evolution 2020-2024 des distances entre stations GNSS permanentes (baselines). Calculs réalisés par le logiciel GipsyX/JPL, graphe réalisé par F. Beauducel/IPGP.

### 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 2024, une campagne de mesure a été réalisée (du 19 septembre au 15 octobre par 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 2mm/an et ne montrent pas de tendance claire à l'inflation ou la déflation (Fig. 13 gauche). Les plus grands vecteurs (ACCB et MOMA avec 2 mm/an) ont une grande incertitude.

A l'échelle du volcan (Fig. 13 droite), les mesures répétées confirment l'inflation radiale du sommet du dôme avec des vitesses horizontales de 10 à 18 mm/an. Cette déformation importante reflète la pressurisation superficielle du système hydrothermal (voir modélisation des signaux acquis sur les stations permanentes). Sur le flanc sud-ouest du dôme, l'instabilité gravitaire atteint 16-18 mm/an et diminue progressivement vers la base du dôme jusqu'à des valeurs de 5-6 mm/an (SAVM, BEL1, AGAL). On peut remarquer que BLK0 et BOB sont concernés par ce glissement. Le piton Tarade (TAR1, TAR3) semble former un léger blocage. Au nord et à l'est du dôme (NEZ2, AMC0, AMC1, TRC2, CRC2, CEC2, ABG0 et CEC2), les vitesses sont inférieures à 2-3 mm/an, confirmant la faible déformation à l'échelle du massif.

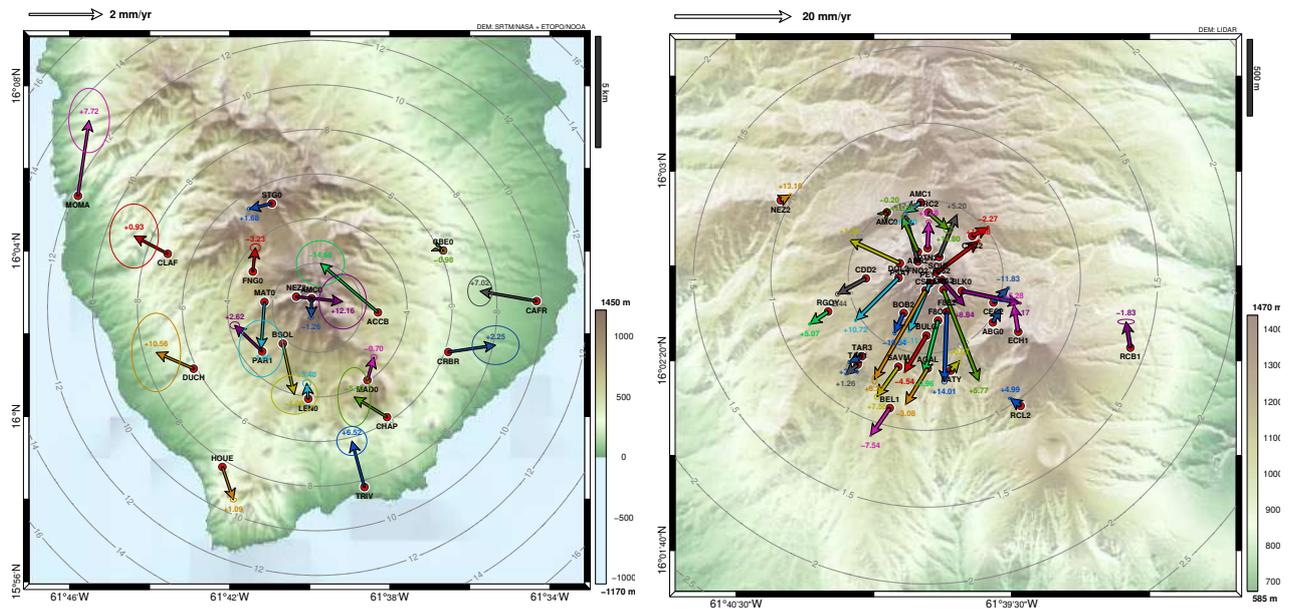


Figure 13. Déformations enregistrées sur une période de 5 ans (1-1-2020 au 1-1-2025) par les mesures GNSS répétées incluant les dernières mesures de septembre-octobre 2024 (J.-B. de Chaballier). Gauche : à l'échelle du sud Basse-Terre. Les vitesses horizontales les plus élevées (env. 2 mm/an) sont enregistrées aux sites ACCB et MOMA. Droite : à l'échelle du volcan de la Soufrière. Les vitesses horizontales les plus élevées sont enregistrées aux sites CRA2 (17.0 mm/an, vecteur vert) et CSD2 (17.8 mm/an, vecteur marron). Graphes réalisés par le logiciel WebObs/IPGP.

### 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. 14 et 15) 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. 14 et 15). 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'accroît, 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.

En 2024, ces tendances à la fermeture des grandes failles de la Soufrière s'arrêtent, à l'exception du gouffre Dupuy (site DUP2) au nord qui poursuit sa fermeture. Nous assistons dans un premier temps à un régime statique (Nap1, F8J1, DOL2, F302) avant que la reprise de l'ouverture au sommet du dôme de la faille Napoléon – Juillet 1976 (sites NAP1 et F8J1) en seconde partie d'année. Au premier ordre le changement de comportement des grandes failles observé entre 2021 et 2024 (contraction puis reprise de l'ouverture) est cohérent avec les déformations du dôme enregistrées par les stations GNSS permanentes (Fig. 12).



Figure 14. 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).

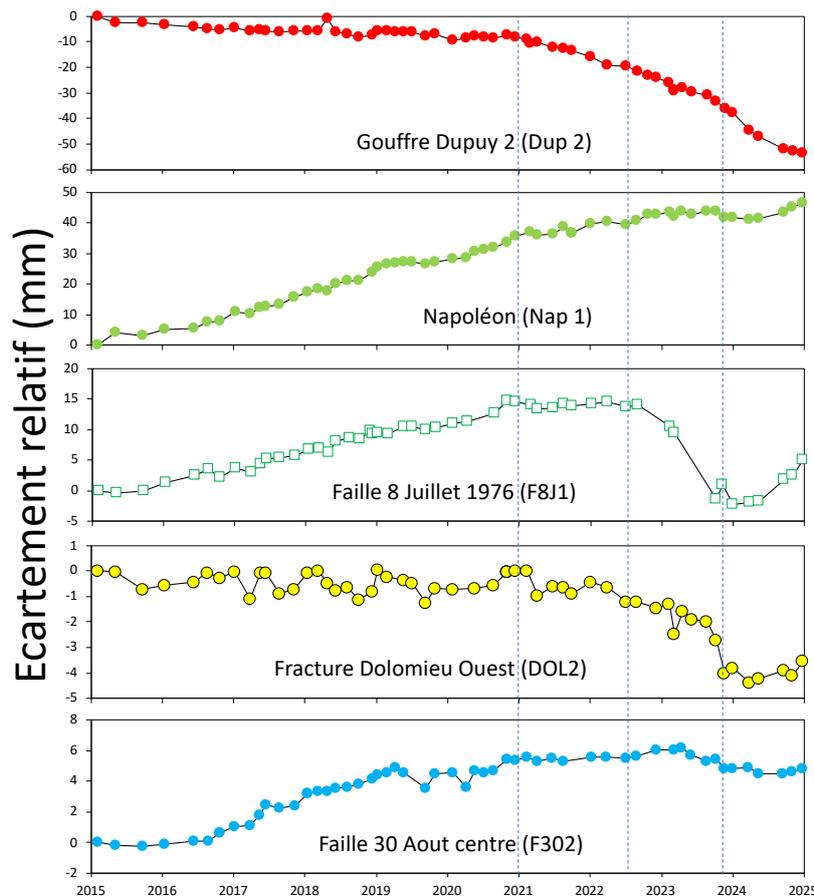


Figure 15 : Mesures d'extensométrie illustrant l'évolution de l'ouverture des failles au sommet de la Soufrière entre 2015 et 2024. Les lignes pointillées indiquent les changements remarquables.

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.

### Observations et mesures aux événements des fumerolles (température, acidité)

Les mesures de température aux événements Cratère Sud et Napoléon Nord sont illustrées sur les figures 16 (imagerie infrarouge) et 17 (mesures par sonde).

**Secteur Cratère Sud** : Les événements de la fissure Cratère Sud ont beaucoup évolué entre 2020 et 2024. 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**. 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. 16) et des sondes de températures permanentes installées à l'été 2023 par le groupe de l'ANR MegaMu (sondes actives quelques semaines).

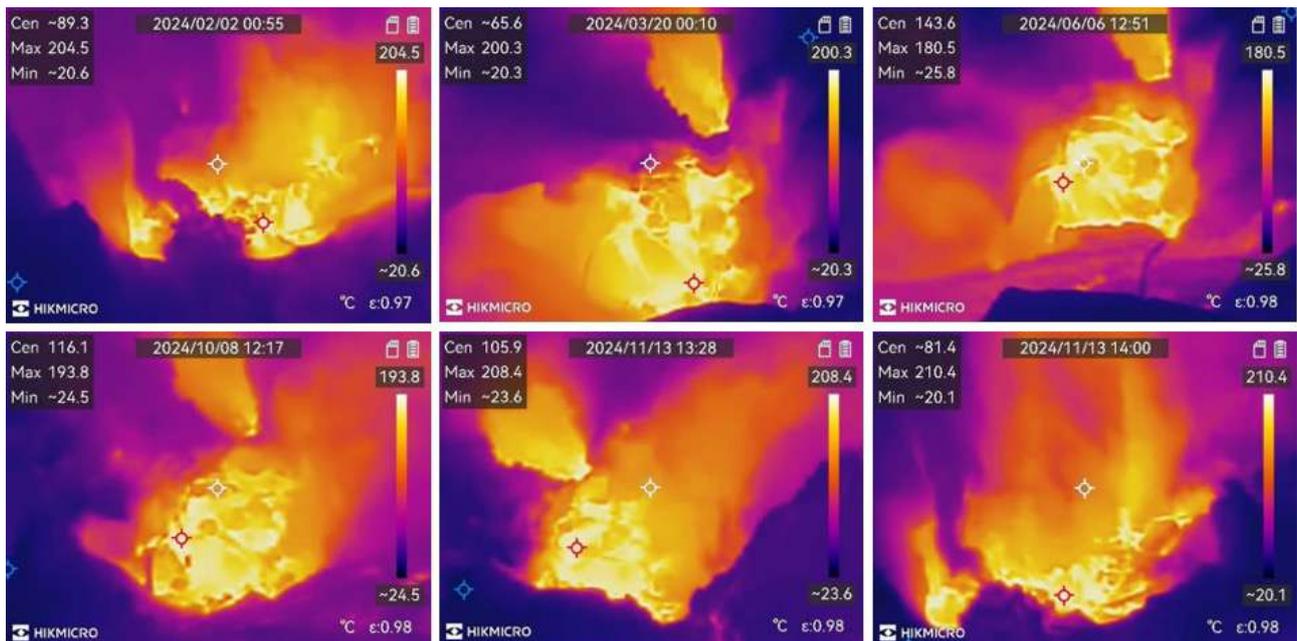


Figure 16 : Images thermiques de la bouche sud (CSS) de la fracture Cratère Sud entre février et novembre 2024. Les images ont été prises à partir du bord Est de la fracture, sauf l'image en bas à droite qui a été prise depuis le bord Ouest. Images prises avec une caméra HIKMICRO M11.

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 depuis 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 ont légèrement baissé pendant l'année 2024 (Fig. 16 et 17), tout en restant largement supérieures aux valeurs mesurées avant 2023. Les dernières mesures réalisées en novembre 2024 (**jusqu'à 210°C à CSS** par caméra IR, Fig. 16)) indiquent que ce refroidissement n'a été que transitoire. Lors des fortes pluies d'août 2024, on note que l'événement CSN est redescendu ponctuellement dans la zone des 100°C, alors que la température de CSS a été peu affectée (196°C) probablement en raison de sa puissance thermique élevée. On notera que **les températures relevées en 2023 et 2024 à CSS sont les plus élevées mesurées dans les fumerolles de la Soufrière**, le précédent maximum (180°C) ayant été mesuré sur une fumerolle active pendant la crise éruptive de 1975-1977 (Feuillard et al., 1983). Le pH du panache condensé (condensation passive) a montré des variations importantes (0.61 à 2.69) en 2024.

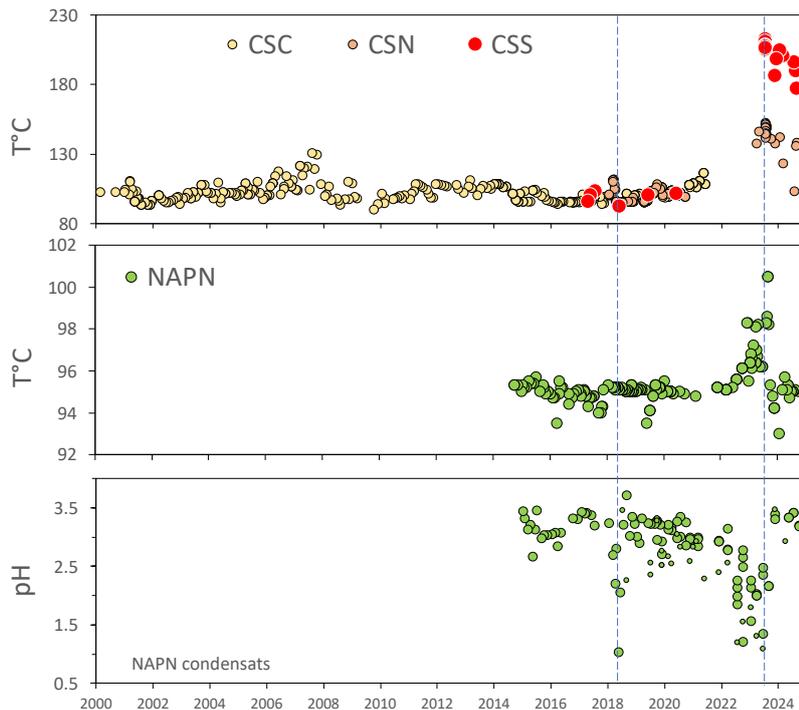


Figure 17 : De haut en bas : température des événements de la fissure Cratère Sud (CSS, CSC, CSN), température de l'événement NapN, pH des condensats de l'événement NapN (Grands cercles = condensation forcée par refroidissement. Petits cercles = condensation naturelle). Les lignes pointillées indiquent les pics d'acidité (2018 et 2023) et de température (2023).

**Secteur Napoléon Nord** : Depuis son apparition en 2014, la température de l'événement 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'événement a fait une incursion (98.3°C) nettement au-delà de 95°C (Fig. 17). 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 redescendue fin 2023, et est restée proche de 95°C toute l'année 2024. 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. 17). En accord avec la température, les pH sont restés stables et dans la gamme normale en 2024.

**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 s'est approfondi de 1 à 2 m en début d'année 2023. Début 2024 (9 janvier) des projections d'argiles/cendres se sont produites sur quelques mètres avec des retombées sur le chemin (Fig. 18). Ces phénomènes témoignent d'une instabilité du secteur, et incitent à la vigilance. Si la température de la fumerolle est restée proche de 94-95°C pendant l'année 2024, une température de **117°C** a été relevée le 24 août.



Figure 18: Projections de boues et cendres au site NAPE1 le 9 janvier 2024. Gauche : photo du dépôt prise le lendemain. Droite : Cartographie de la retombée (C. Berthod).

**Gouffre Tarissan** : Le système fumarolien du Gouffre Tarissan s'est réactivé entre 1998 et 2000. Le Gouffre héberge un lac acide permanent dont le niveau et la composition ont beaucoup varié depuis son suivi en 2003 (voir section sur le lac). Bien que le niveau et la composition du lac soient plus ou moins stables depuis 2022, le dégazage du lac a montré de fortes instabilités en 2024. En particulier, le 1<sup>er</sup> octobre 2024, un pic d'activité a émis un nuage de vapeur et de particules qui a recouvert la partie centrale du dôme. Ce pic d'activité a été accompagné d'un pic de température à la fumarole voisine Napoléon Nord et d'un signal sismique basse fréquence (Fig. 19).



#### Exemple suivi de la phénoménologie : Pulse Tarissan 1 Octobre 2024

##### Enregistrement optique, thermique et sismique

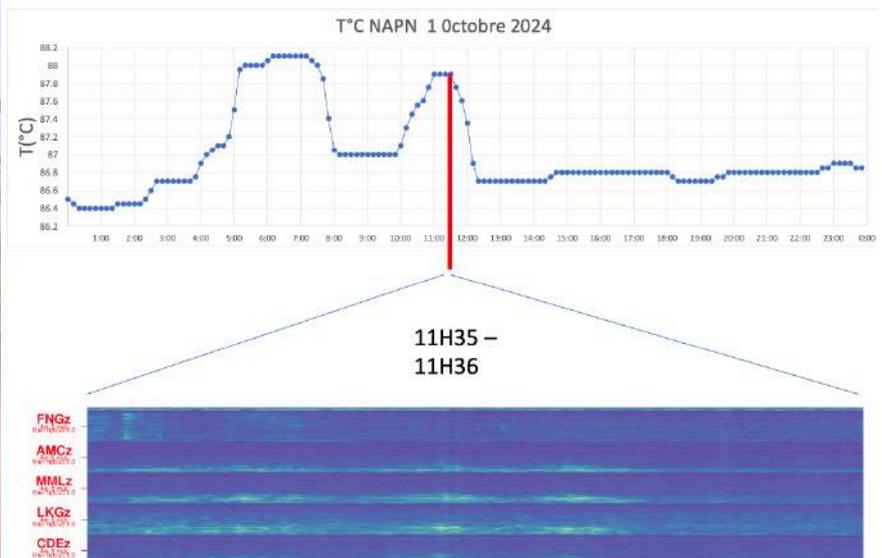


Figure 19: Pic d'activité du Gouffre Tarissan le 1<sup>er</sup> octobre 2024. Photo prise par Willy Sextius depuis le point de vue de la Découverte. Le film également pris lors de cet événement montre que le nuage de vapeur et de particules a impacté le premier champ visible sur la photo (Gouffre Dupuy).



**Gouffre 56** : Le Gouffre 1956 réactivé depuis 2007, montre des forts débits, assez stables après l'augmentation significative débutée en septembre 2015. Le panache est resté très acide en 2024, avec des valeurs de **pH (0.52 à 0.79)** parmi les plus faibles mesurées sur ce site (pH des vapeurs diluées collectées par condensation passive).

**Fracture Lacroix** : La fracture Lacroix réactivée en 2011, montre une activité en augmentation depuis plusieurs années, avec des dépôts de soufre sur les parties basse et haute. Sur la base d'une seule mesure en 2024 (réalisée au site Lacroix supérieur), la fracture Lacroix a émis un panache moins acide (**pH 3.38**) que celui du Gouffre 56.

**Gouffre Hammouya** : Un activité fumerolienne associée à une dégradation de la végétation se développe à proximité du site « Gouffre Hammouya » sur le flanc sud-est. En 2024, l'activité s'est stabilisée voire réduite au niveau du site lui-même, mais une nouvelle zone chaude associée à de la dégradation de la végétation est apparue en aout, une dizaine de mètres après le replat Hammouya dans le sens de la montée.

**Extension de l'activité fumerolienne** : L'activité fumerolienne continue de se développer sur la partie nord et est du dôme. En 2024, la progression est visible 1) à l'Est de la trace reliant Nape1-NAPN, en contrebas du talus vers l'ancien pluviomètre UAG, et 2) au nord, sur la paroi Est du Gouffre Dupuy, et entre le Gouffre et la trace conduisant à la barrière du chemin des dames.

#### Gaz non-condensables

Les gaz incondensables sont très faiblement solubles dans l'eau. Étant peu affectés par les processus hydrothermaux, ils nous renseignent sur les processus profonds. Après l'extinction de la fumerole CSC en 2021, la fumerole 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. 20). Ces compositions récentes se caractérisent par (1) des rapports He/CH<sub>4</sub> proches de la ligne de base observée depuis 2014, et (2) des rapports He/H<sub>2</sub> en légère augmentation mais toujours dans la gamme normale, relativement au pic majeur 2018. On note qu'il existe une augmentation à long terme de la ligne de base du rapport He/H<sub>2</sub>, bien visible dans la série CSC. La fumerolle NapN montre une tendance similaire, mais plus prononcée, si bien que les rapports mesurés fin 2024 sont supérieurs à ceux de CSC avant son arrêt en 2021.

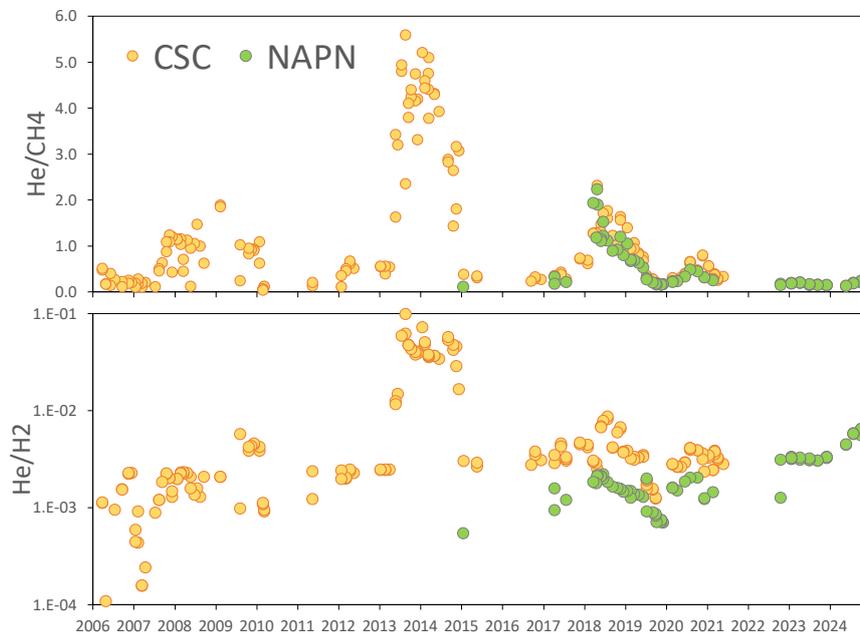


Figure 20. Abondances relatives des gaz non condensables He, H<sub>2</sub> et CH<sub>4</sub> dans les gaz prélevés (ampoule de Giggenbach) à l'évent Napoléon Nord (NAPN). Le dernier échantillon analysé a été prélevé le 4 décembre 2024. Les mesures réalisées sur CSC (éteint en 2021) sont rapportées pour comparaison



### Composition de la phase gazeuse complète ou « gaz total »

Le calcul de la composition du gaz total est réalisé en intégrant des mesures faites sur la phase condensée et sur la phase non-condensée. L'évolution de la composition du gaz total est rapportée sur la figure 21 pour la période 2017-2024, pour laquelle les **méthodes de prélèvement (ampoule NaOH), d'analyse (spectromètre de masse quadripolaire à source gazeuse) et de calcul (tableur excel V. Robert – R. Moretti) sont identiques**. Les compositions d'échantillons de 2006 et 2012 prélevés et analysés suivant la même méthode (Allard et al., 2014) sont indiquées pour comparaison.

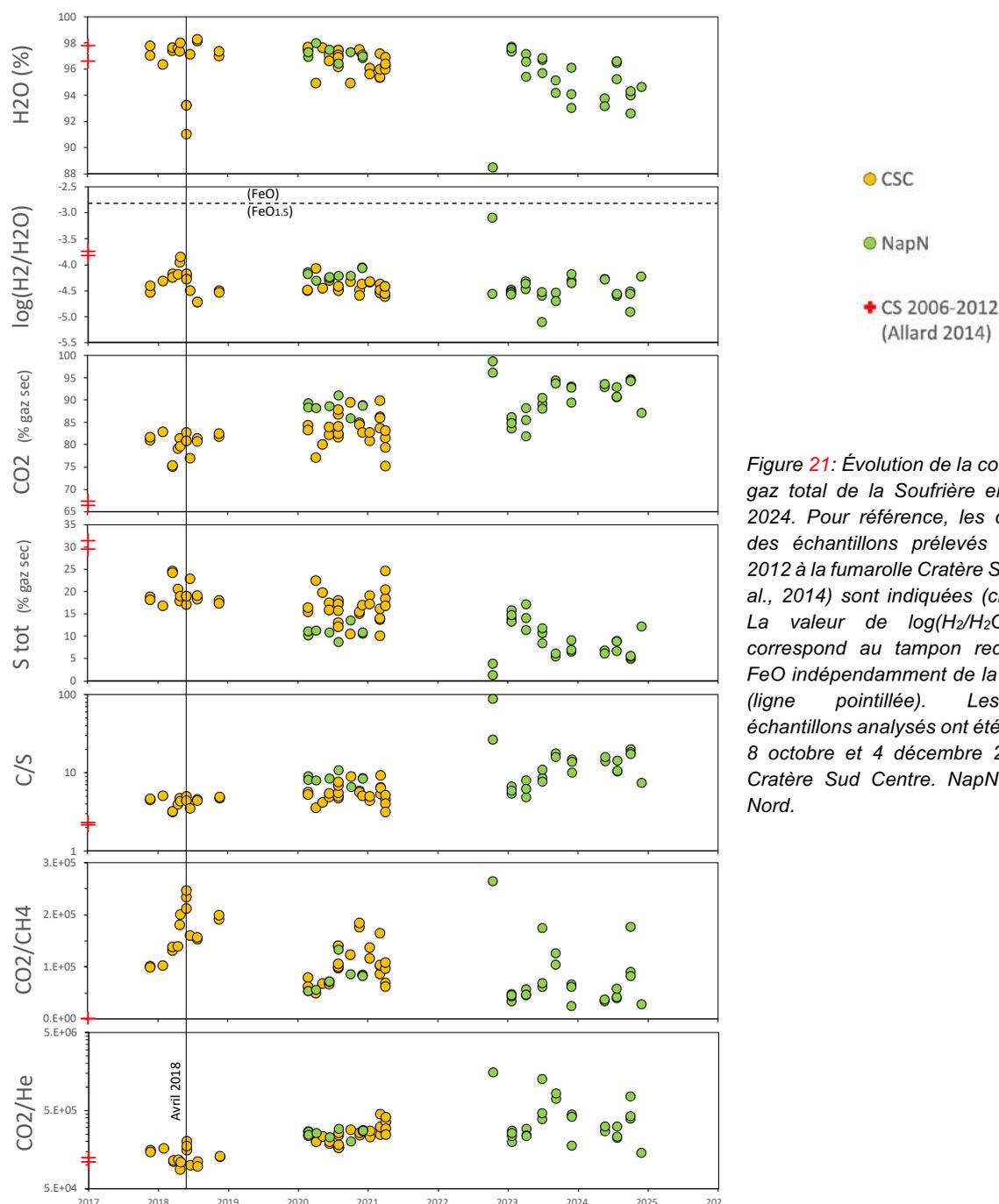


Figure 21: Évolution de la composition du gaz total de la Soufrière entre 2017 et 2024. Pour référence, les compositions des échantillons prélevés en 2006 et 2012 à la fumarolle Cratère Sud (Allard et al., 2014) sont indiquées (croix rouges). La valeur de  $\log(\text{H}_2/\text{H}_2\text{O}) = -2.82$  correspond au tampon redox  $\text{Fe}_2\text{O}_3 - \text{FeO}$  indépendamment de la température (ligne pointillée). Les derniers échantillons analysés ont été prélevés les 8 octobre et 4 décembre 2024. CSC : Cratère Sud Centre. NapN : Napoléon Nord.



L'année 2024 est représentée par 9 échantillons prélevés à l'événement NapN au cours de 4 sorties (28 mai, 30 juillet, 8 août, 4 décembre). L'analyse de ces échantillons a révélé :

- Des teneurs en H<sub>2</sub>O basses (moyenne à 94.5%) par rapport aux valeurs mesurées ces dernières années (entre 95 et 98% de H<sub>2</sub>O généralement, avec ponctuellement jusqu'à 91% H<sub>2</sub>O pendant la crise de 2018), confirmant la **tendance à l'assèchement des gaz** qui a commencé à se dessiner en 2023.
- Des rapports H<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O dans la gamme des valeurs mesurées depuis 2017. Le rapport H<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O, qui a la particularité de varier avec l'état redox du système hydrothermal indépendamment de sa température, indique donc des conditions oxydantes (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>>FeO) persistantes et relativement stables dans le temps.
- Des concentrations élevées en CO<sub>2</sub> (92.3% du gaz sec en moyenne), basses en H<sub>2</sub>S (7.1% du gaz sec en moyenne), et par conséquent des rapports C/S élevés (14.1 en moyenne). Cette signature confirme l'**enrichissement en CO<sub>2</sub> des gaz** au cours du temps, bien visible sur le court terme (depuis 2017) et très marquée par rapport aux échantillons de référence de 2006-2012 (Allard et al., 2014). L'augmentation du rapport C/S pourrait indiquer une contribution croissante du dégazage profond (CO<sub>2</sub>) par rapport au dégazage plus superficiel (S) dans la partie nord du dôme, et/ou un piégeage croissant du soufre dans le système hydrothermal.

#### Thermo-barométrie des gaz (prélèvement avec ampoule à soude)

Les analyses du gaz total apportent également des informations sur les conditions de pression et de température d'équilibre des gaz (modèle de Chiodini & Marini, 1998) (Fig. 22). Les échantillons collectés en mai et juillet 2024 ne contenaient pas de CO détectable, indiquant des températures et pressions d'équilibre des gaz très basses, mais non-quantifiables. Les échantillons d'octobre et de décembre 2024, contenant du CO détectable, confirment la diminution de la température et de la pression d'équilibre des gaz (184-231°C avec une moyenne à 218°C, 12-47 bars avec une moyenne à 27 b), prolongeant la tendance initiée en 2018, voire dès 2006 (Fig. 22). Cette tendance est bien visible lorsque les solutions P-T du modèle sont rapportées en fonction du temps (Fig. 23). La **diminution des température et pression d'équilibre des gaz au cours du temps** peut être expliquée par le **maintien des équilibres chimiques entre espèces gazeuses jusqu'à des profondeurs faibles** (faibles pressions et températures) dans un système hydrothermal plus ouvert vers la surface. Cette hypothèse est en accord avec la dernière tomographie électrique du dôme (réalisée en 2023) qui révèle le développement d'une connectivité (domaines conducteurs constitués de fluides et/ou roche altérée) entre les racines des fumerolles et le système hydrothermal central qui avait été cartographié entre 2003 et 2011 (Rosas-Carbajal et al, 2016) (Communication 2024, F. Fischanger, C. Truffert, A. Rosselli, projet ANR MegaMu). Dans l'hypothèse où la pression d'équilibre est égale à la pression lithostatique, la profondeur d'équilibre des gaz est remontée depuis env. 1100 m sous le sommet en 2006 (223 bars) à moins de 150 m fin 2024 (Fig. 24). Les mesures réalisées en 2024 sur la fumerolle NapN se rapprochent des conditions P-T de surface (P=1 bar, 96°C).

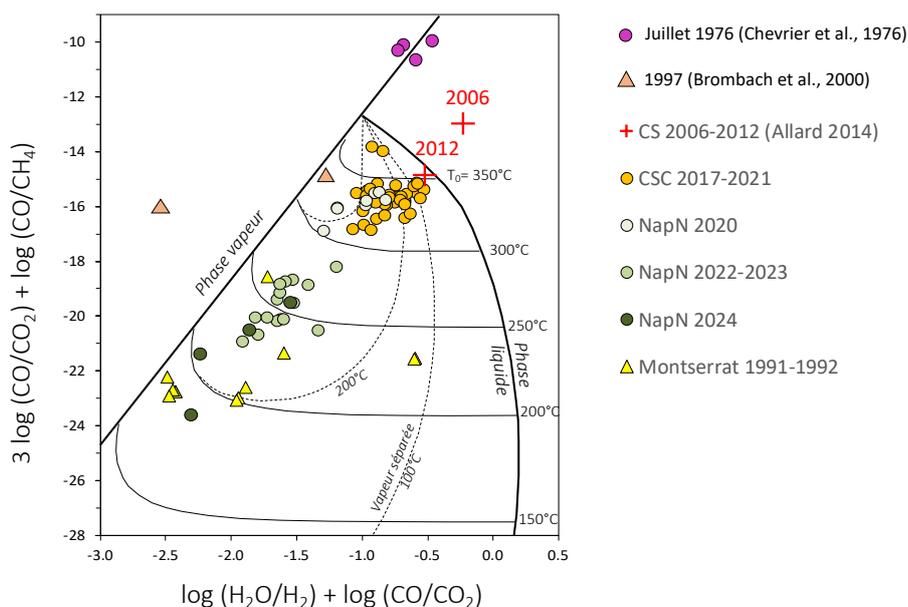


Figure 22. Projection de la composition du gaz total de la Soufrière de Guadeloupe dans un espace d'équations où la température et la pression d'équilibre des gaz sont indépendants des conditions redox (Chiodini and Marini, 1998 ; Moretti et al. 2020). Les températures d'équilibre ( $T_0$ , lignes fines continues) et de la vapeur séparée (lignes pointillées) sont indiquées. Les lignes épaisses indiquent les changements de phase. La composition du gaz émis à Montserrat en 1991-1992, peu avant sa réactivation en 1995, est indiquée (Chiodini et al., 1996).

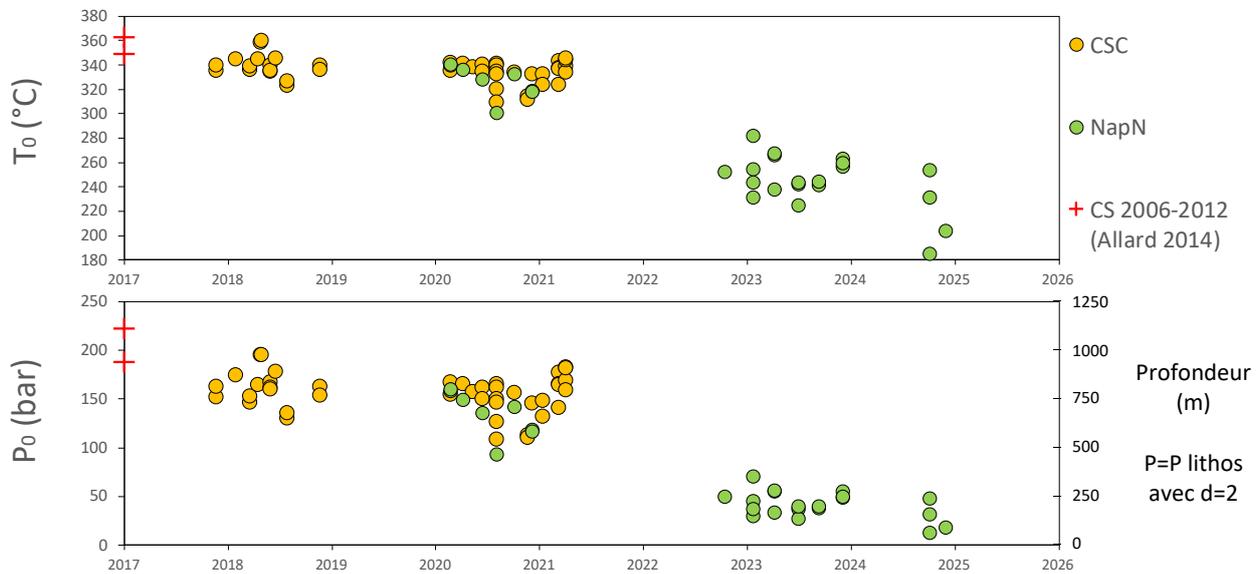


Figure 23. Evolution de la température et de la pression d'équilibre des gaz de la Soufrière entre 2017 et 2024. Pour référence, les conditions P-T calculées pour échantillons prélevés en 2006 et 2012 à la fumarolle Cratère Sud (Allard et al., 2014) sont indiquées (croix rouges). Les solutions du P-T du modèle de Chiodini & Marini (1998) ont été calculées à l'aide d'un programme python (Stage de Sarah Dhambahadour, 2024). La profondeur d'équilibre est indiquée dans le cas où la pression d'équilibre est égale à la pression lithostatique, avec une densité moyenne de 2 pour le dôme.

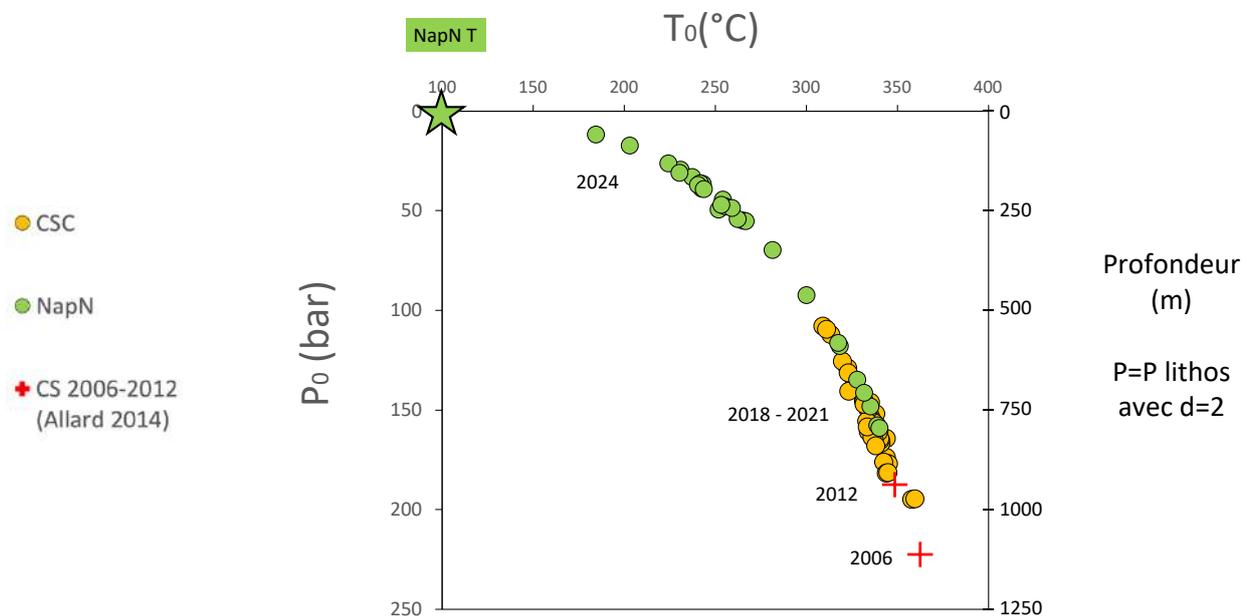


Figure 24. Relation entre la température et la pression d'équilibre des gaz de la Soufrière sur la période 2006-2024 (thermobaromètre de de Chiodini & Marini, 1998). Les pression et température d'équilibre diminuent au cours du temps, les dernières mesures sur la fumarolle NapN se rapprochant des conditions P-T de surface (étoile). La profondeur d'équilibre est indiquée dans le cas où la pression d'équilibre est égale à la pression lithostatique, avec une densité moyenne de 2 pour le dôme.



### 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). Deux rapports sont particulièrement suivis : le rapport  $\text{SO}_2/\text{H}_2\text{S}$  dont les valeurs élevées sont caractéristiques des gaz magmatiques de haute température, et le rapport  $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{S}$  qui renseigne sur le dégazage magmatique profond. Ces rapports peuvent cependant être modifiés par des processus secondaires qui compliquent leur lecture.

Entre 2019 et mars 2023, les données montrent une augmentation continue du rapport  $\text{SO}_2/\text{H}_2\text{S}$  et une relative stabilité du rapport  $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{S}$  sur les sites CSN, NapN et Gouffre 56 (Fig. 25). L'augmentation du rapport  $\text{SO}_2/\text{H}_2\text{S}$  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  $\text{SO}_2$  dans les lacs présents au fond des gouffres. En mars 2023, les rapports  $\text{SO}_2/\text{H}_2\text{S}$  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). En seconde partie d'année 2023 et en 2024, le rapport  $\text{SO}_2/\text{H}_2\text{S}$  a généralement baissé. Le rapport  $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{S}$  a également généralement baissé sur cette période, sauf à la fumerolle NapN où  $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{S}$  a augmenté de façon marquée.

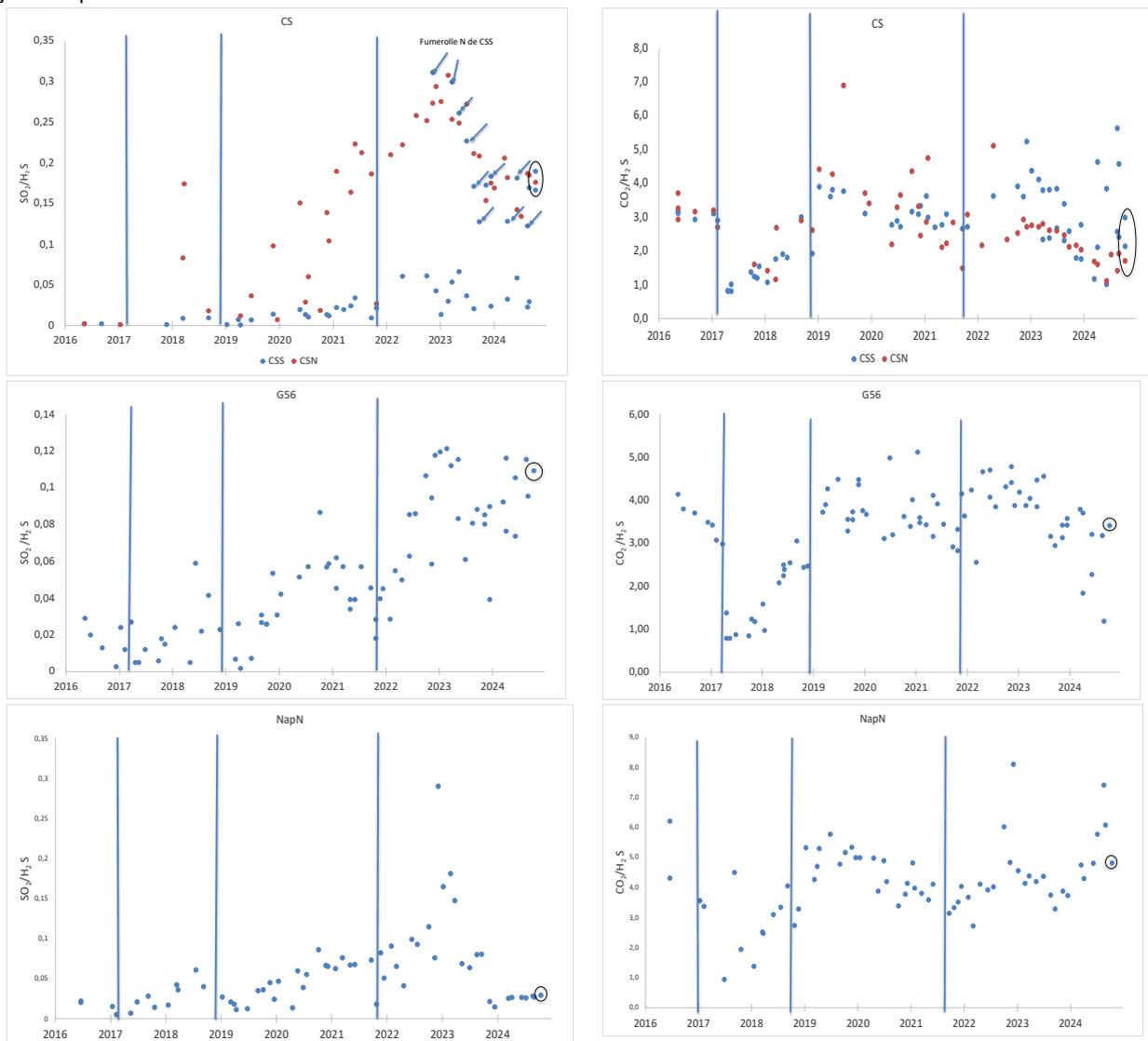




Figure 25 (page précédente) : Évolution des rapports  $SO_2/H_2S$  et  $CO_2/H_2S$  dans les panaches de gaz émis par les événements CS (Cratère Sud), G56 (Gouffre 56) et Napoléon Nord (NAPN). Le site CS comprend un événement nord (CSN) et plusieurs événements sud (CSS). La bouche principale de CSS (flèches), la plus au nord et donc la plus proche de CSN, a la même composition que CSN. Les lignes bleues marquent des changements de compositions chimiques observées sur la plupart des sites (Mars 2017; Décembre 2018; Octobre 2021). Les cercles noirs indiquent les dernières mesures effectuées le 17/10/2024.

#### Flux de $CO_2$ dans le sol

Le flux de  $CO_2$  s'échappant du sol de la Soufrière a été mesuré en 2006, 2012, 2022 et 2023 dans le cadre de projets de recherche ponctuels (Allard et al., 2014 ; Klein et al., 2024). L'OVSG a initié en 2024 un projet de suivi plus régulier. La première campagne de mesure réalisée en septembre 2024 a mis en évidence des flux de  $CO_2$  significatifs (i.e. supérieurs à  $17.6 \text{ g/m}^2/\text{j}$ , valeur médiane des mesures de Klein et al., 2024) (Fig. 26) :

- au sommet du dôme, les flux de  $CO_2$  (jusqu'à  $185 \text{ g/m}^2/\text{j}$  dans le secteur de Napoléon Nord) sont comparables à ceux mesurés en 2022-2023 ( $<300 \text{ g/m}^2/\text{j}$  en très grande majorité, Klein et al., 2024)
- sur la faille de la Ty Sud, au niveau de la route de la citerne, les flux mesurés ( $<46 \text{ g/m}^2/\text{j}$  sur 2 points) sont plus faibles que les ceux mesurés en 2006 ( $>5000 \text{ g/m}^2/\text{j}$  pour 4 points sur 18, Allard et al., 2014). Cette différence pourrait être due à un échantillonnage plus faible en 2024.
- sur la faille de la Ty Nord, un flux de  $CO_2$  significatif ( $43 \text{ g/m}^2/\text{j}$ ) a été mis en évidence pour la première fois à la croisée des chemins Carmichaël - Col de l'Echelle.

Ces observations devront être confirmées/nuancées par de nouvelles campagnes de mesure.

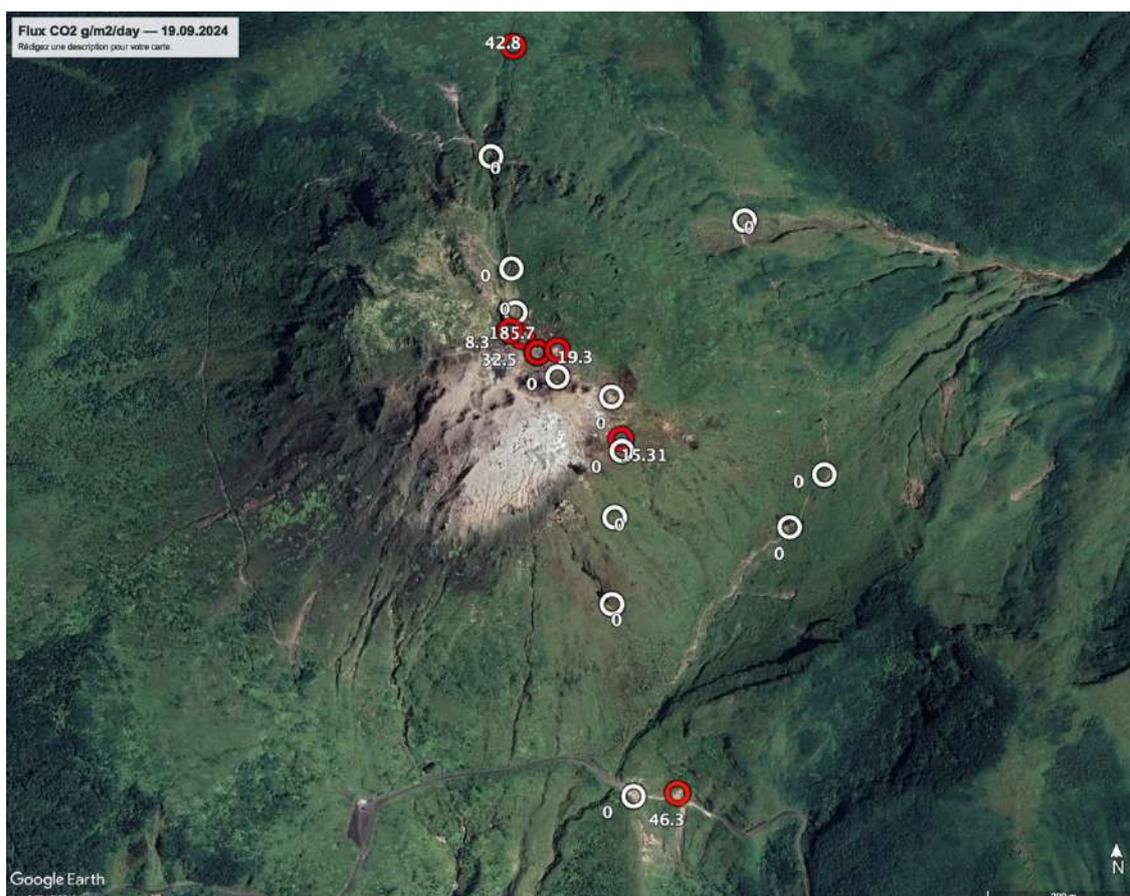


Figure 26. Mesure du flux de  $CO_2$  s'échappant du sol sur et autour du dôme de la Soufrière. Mesures réalisées le 19 septembre 2024 à l'aide d'une chambre d'accumulation et d'un dispositif de mesure West System. Les valeurs indiquées sont en gramme de  $CO_2$  par  $m^2$  et par jour.



## Bilan et interprétation

Le maintien de la température de la fumerole Cratère Sud Sud (CSS) dans la zone des 200°C tout au long de l'année 2024 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 déséquilibre entre le flux de chaleur profond et la quantité d'eau disponible dans le système hydrothermal est entretenu par une pluviométrie encore faible en 2024 au sommet de la Soufrière (3741 mm à la Station Piton Sanner). Les températures et pression d'équilibre des gaz de la fumerole Napoléon Nord ont poursuivi leur diminution, se rapprochant des conditions de surface. En accord avec les dernières tomographies électriques du dôme, cette évolution pourrait refléter un système hydrothermal en expansion, plus ouvert vers la surface dans la partie Nord et Est du dôme, où l'activité fumerolienne s'est étendue ces dix dernières années.

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 gouffre Tarissan, profond de plus de 130 m, héberge un lac acide en ébullition alimenté à sa base par une ou plusieurs fumerolles. Depuis le début de son suivi en 2003, le lac a montré d'importantes variations de son niveau et de sa composition (Fig. 27), principalement liés à des phénomènes d'évaporation et remplissage:

(1) Entre 2003 et 2010, le niveau du lac est généralement haut (-80 à -90 m, relativement au point de descente du système de prélèvement, situé 10 m au-dessus du pont naturel Tarissan-Dupuy). Au cours d'événements d'évaporation transitoires, son niveau baisse à -100m en 2007 et -110m en 2009-2010. Ces événements sont accompagnés d'une baisse du pH, d'une augmentation des concentrations en Mg, Ca, Na et Cl, et ainsi qu'une hausse de l'indice d'équilibre chimique qui reflète le temps de résidence de l'eau.

(2) Entre 2011 et 2021, le niveau du lac descend progressivement pour atteindre -120m sous la cote de référence. 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), de l'indice d'équilibre chimique (de 1.1 à 1.5) et une baisse du pH (de 0 à -0.7) du lac. Cette évolution chimique témoigne de l'évaporation quasi-totale du lac en accord avec son niveau très bas, proche du fond rocheux estimé à -125 m (mesures OVSG 2023 et topographie de Kuster et Silve, 1997), et d'un temps de résidence croissant de l'eau.

(3) Le niveau du lac remonte rapidement en 2022 reprenant en quelques mois pas moins de **40 mètres**. Ce remplissage majeur est le résultat de **l'apport de fluides peu minéralisés et peu acides** (pauvres en cation et Cl) mais **riches en sulfates**.

(4) Depuis la remontée du lac en 2022, la plupart des paramètres chimiques (composition et pH) sont revenus à des valeurs normales proches de celles mesurées avant 2019. On observe cependant :

- un excès de  $\text{SO}_4$  par rapport à Ca, pour la première fois depuis 2010. **Entre 2022 et 2024, le rapport ( $\text{SO}_4/\text{Ca}$ ) à continuer à croître pour atteindre des valeurs proches de 2 qui n'avaient pas été mesurées depuis le tout début du suivi en 2003-2005.** Cette évolution nouvelle peut avoir plusieurs origines. Comme expliqué dans le rapport annuel précédent, la concentration en  $\text{SO}_4$  du lac Tarissan est contrôlée par la solubilité du gypse ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), qui dépend de plusieurs facteurs dont l'acidité.
- un **indice d'équilibre chimique Na-K-Mg en baisse**, qui témoigne d'une circulation active des fluides hydrothermaux et d'un temps de résidence bas.

Parmi les différentes observations réalisées en 2024, un test de mesure du pH (échantillon prélevé le 16 mai 2024) par différentes méthodes a révélé des différences significatives : +0.01 par sonde pH, -0.12 par titration de l'excès de  $\text{H}^+$  avec de la soude et -0.13 en faisant l'hypothèse que tous les ions  $\text{H}^+$  en excès sont apportés par HCl ( $[\text{H}]^+ = [\text{Cl}]^-$ ). Ce test indique (i) que la sonde pH sous-estime la concentration en  $\text{H}^+$ , car une partie des ions  $\text{H}^+$  sont engagés dans des liaisons et ne sont pas libres. **Le lac Tarissan n'est donc pas une solution idéale où l'activité est égale à la concentration** (le coefficient d'activité n'est pas égal à 1), et (ii) que tous les ions  $\text{H}^+$  sont bien apportés par HCl (pas de contribution significative d'un autre acide comme  $\text{H}_2\text{SO}_4$ ).

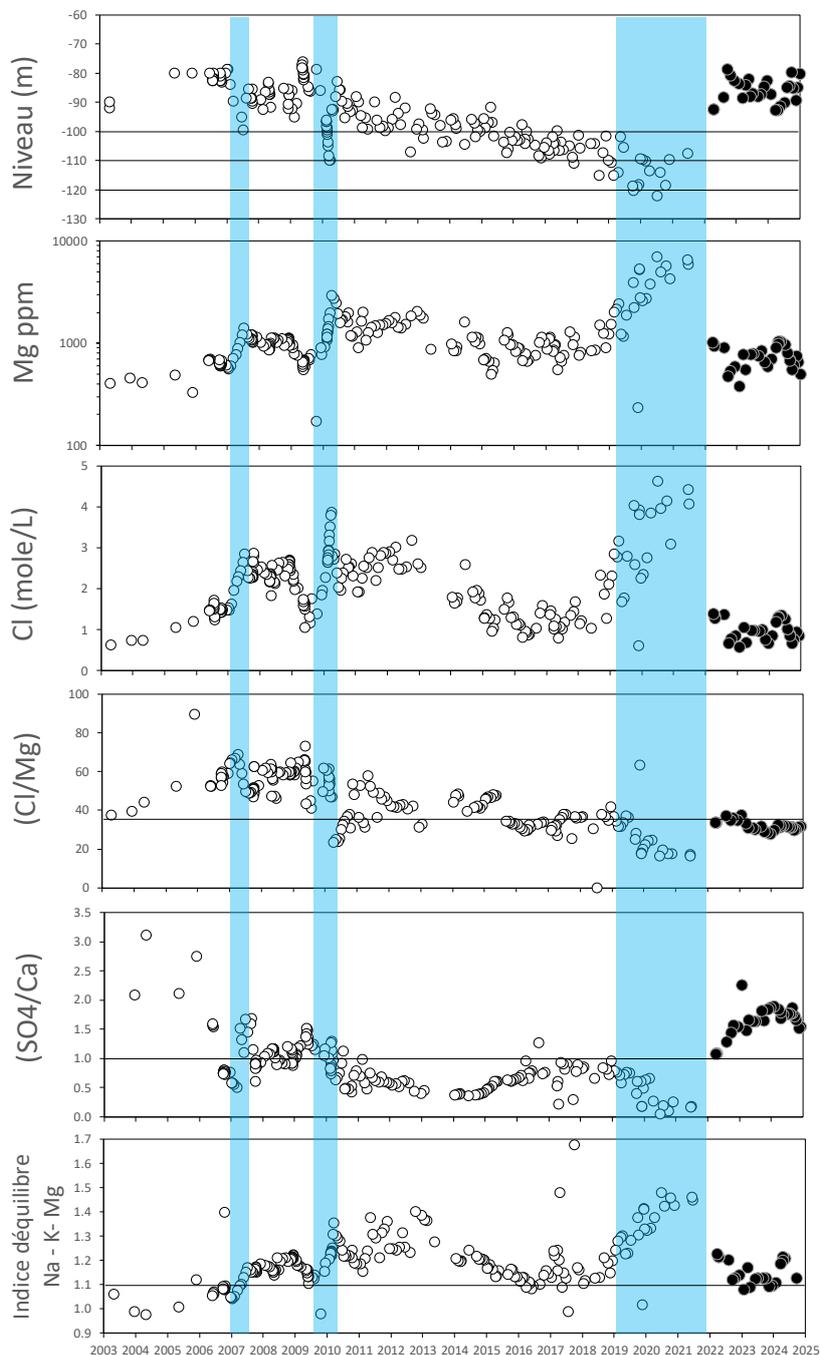


Figure 27 : Evolution du niveau et de la composition du lac Tarissan entre 2012 et 2024. Le niveau du lac est relatif au point de descente du système de prélèvement (1445 m), 10 mètres au-dessus du pont naturel séparant les Gouffres Dupuy et Tarissan (1435 m). L'indice d'équilibre chimique ou « indice de maturité » est égal à  $0.315 * \log(K^2/Mg) - \log(K/Na)$  (Giggenbach 1988), et vaut 2.0 pour une équilibre partiel, et 2.66 pour un équilibre total. Les bandes bleu clair indiquent les périodes d'évaporation majeures (2007, 2009-2010 et 2019-2021), pendant lesquelles les éléments se concentrent fortement dans le liquide résiduel. Symboles ouverts : 2003-2021. Symboles fermés : 2022-2024..



**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  $\text{SO}_2$  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).

### > Sources thermales

Parmi les 15 sources thermales régulièrement suivies par l'OVSG, on distingue trois groupes principaux sur la base de leurs compositions physico-chimiques, évolution temporelles et localisations :

- Les sources non-connectées au système hydrothermal (Bains Chauds-Matouba et Habitation Revel) localisées à l'extérieur du cratère Amic à l'ouest du massif de La Soufrière ne montrent pas d'évolution temporelle majeure de leur température et composition en relation avec la réactivation du volcan (Fig. 28 et 29). Bains Chauds-Matouba émet une eau très chaude ( $59^\circ\text{C}$ ) légèrement acide ( $\text{pH}=5.7$ ) représentant le pôle riche en  $\text{SO}_4$ , pauvre en  $\text{Cl}$ , des sources  $\text{Ca} - \text{SO}_4 - \text{Cl}$ . Habitation Revel est une eau peu chaude ( $33^\circ\text{C}$ ) dont la faible acidité ( $\text{pH}=6.6$ ) favorise la solubilité du  $\text{CO}_2$  sous forme de  $\text{HCO}_3^-$ . Depuis 2018, cette source montre d'ailleurs une légère augmentation de la teneur en  $\text{HCO}_3^-$  (Fig. 29).

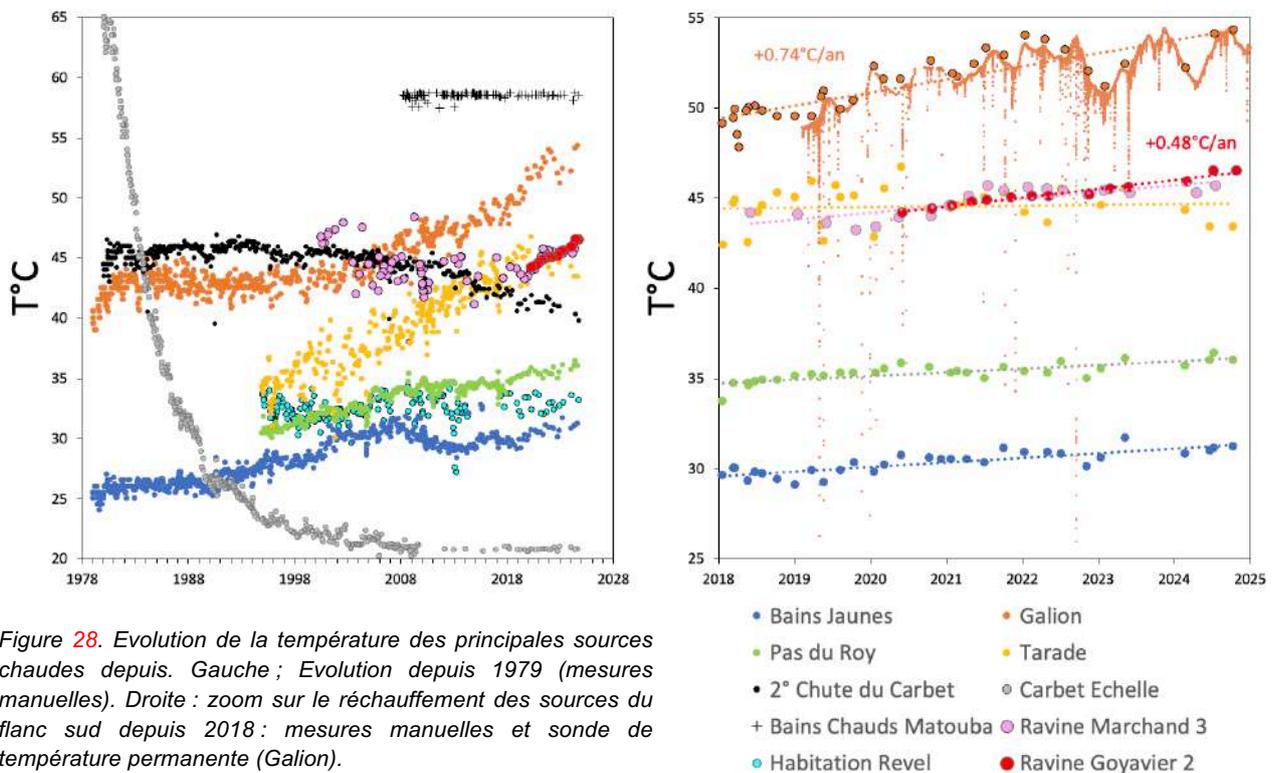


Figure 28. Evolution de la température des principales sources chaudes depuis. Gauche ; Evolution depuis 1979 (mesures manuelles). Droite : zoom sur le réchauffement des sources du flanc sud depuis 2018 : mesures manuelles et sonde de température permanente (Galion).



• Les sources connectées au système hydrothermal sont localisées à l'intérieur de la caldera la plus récente de La Soufrière, au sud et au nord-ouest. La majorité de ces sources (Bains Jaunes, Tarade, Galion, Pas du Roy, Ravine Marchand, Ravine Goyavier, Carbet-Echelle) ont une chimie de type Ca – SO<sub>4</sub> – Cl. Leurs eaux sont acidifiées (4.6 < pH < 5.8) par la dissolution de gaz (SO<sub>2</sub>, HCl) émis par des magmas peu profonds (<8 km). La source 2° Chute du Carbet se distingue par sa chimie de type Ca – Na – Cl qui pourrait refléter un mélange entre les eaux Ca – SO<sub>4</sub> et une composante Na – Cl. Parmi ces sources on distingue :

- les sources localisées sur le flanc sud de la Soufrière **actuellement connectées** au système hydrothermal actif (Bains Jaunes, Tarade, Galion, Pas du Roy, Ravine Marchand, Ravine Goyavier). Ces sources montrent des augmentations régulières de température depuis la réactivation du volcan dans les années 1990 (Fig. 28), ainsi que des pics de Cl (Fig. 29) induits par des phénomènes postérieurs à 1976-1977 (en 2010 à Galion, fin 2020 à Ravine Marchand 3 et Ravine Goyavier 2). La source Galion caractérisée par des teneurs élevées en Cl (300 ppm en 2024) est la source la plus proche et la plus connectée au système volcanique actif. Cette source montre la plus forte augmentation de température ces dernières années (**+0.74°C/an depuis 2018**) devant Ravine Goyavier 2 (**+0.48°C/an depuis le début du suivi en 2020**) (Fig. 28),

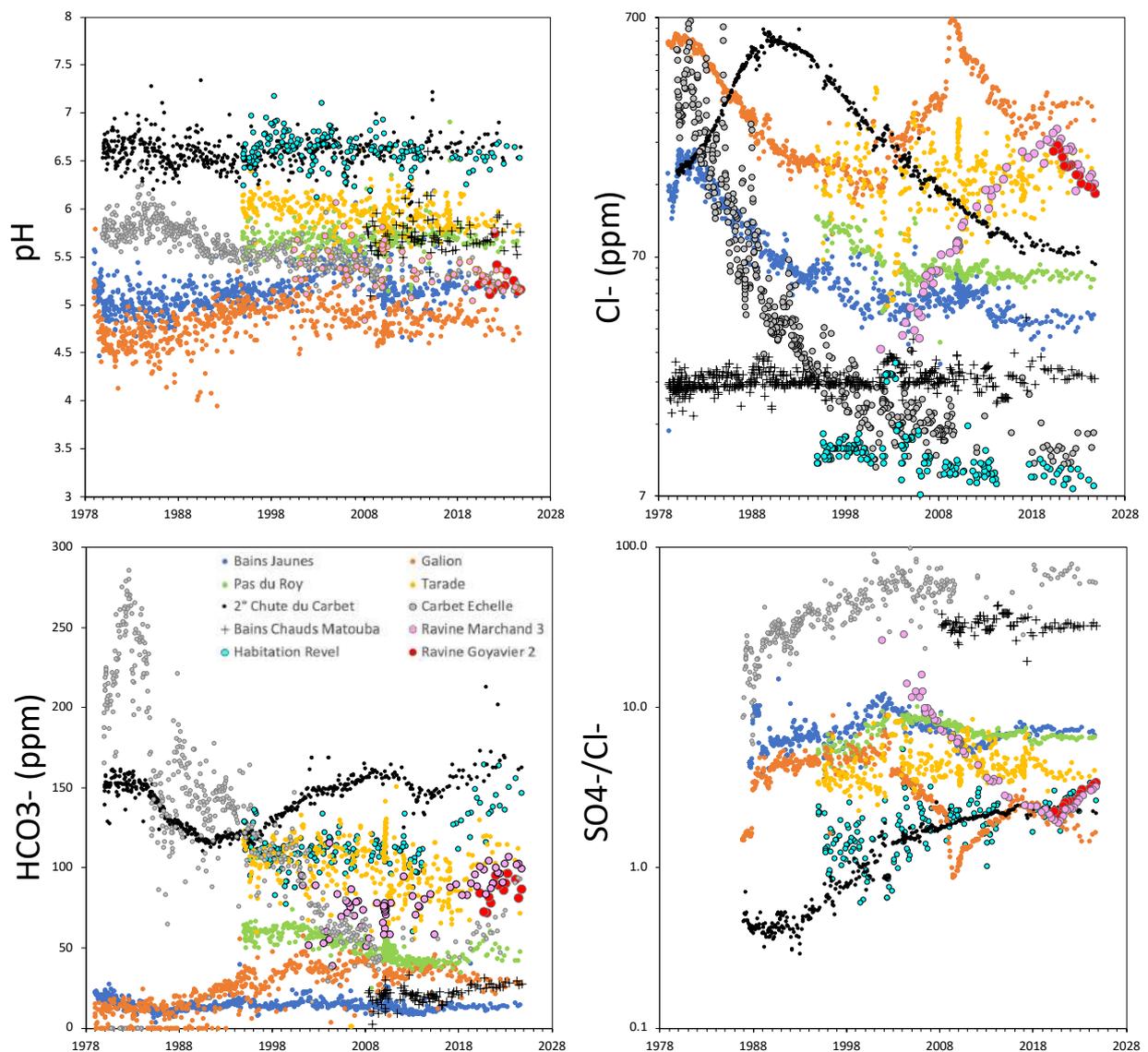


Figure 29 : Evolution du pH et de la composition en anions des sources thermales entre 1979 et 2024.

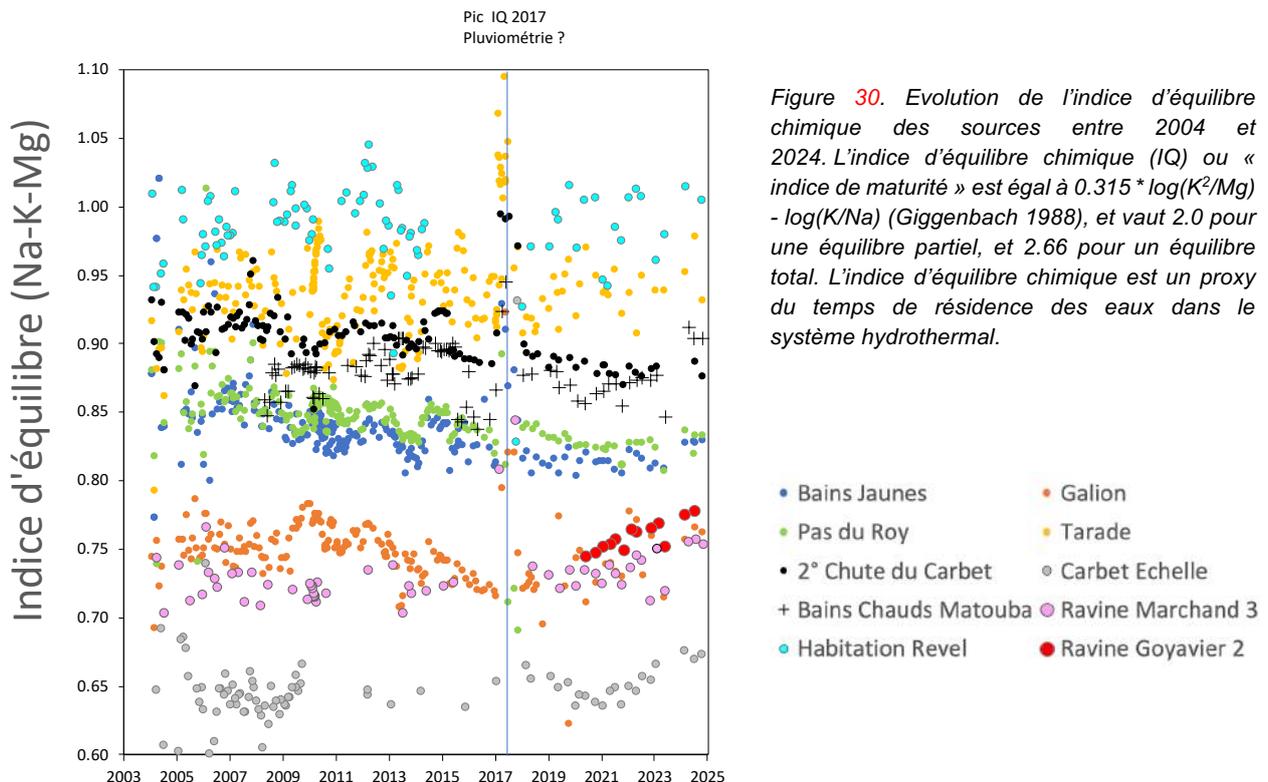


- les sources Carbet-Echelle et 2° Chute du Carbet, localisées sur le flanc nord-ouest de la Soufrière, montrent des baisses de température depuis 1978 (Fig. 28), témoignant d'une déconnexion progressive au système hydrothermal après la dernière éruption. Les baisses régulières des teneurs en Cl dans ces deux sources, depuis des maxima antérieurs à la réactivation de 1992, sont en accord avec cette déconnexion progressive. On note cependant une tendance à la **hausse de HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>**, depuis la réactivation de 1990 à la source 2° Chute du Carbet, et récemment (2018-2024) à la source Carbet-Echelle (Fig. 29). Ces hausses n'étant pas accompagnées d'une hausse du pH, elles peuvent liées à un **apport croissant de CO<sub>2</sub> d'origine profonde**.

Les abondances relatives de Na, K et Mg dans l'ensemble des sources sont typiques d'eaux n'ayant pas atteint l'équilibre chimique avec les minéraux stables dans les systèmes hydrothermaux. Leur indice de maturité ( $MI = 0.315 \cdot \log(K/Na) - \log(K^2/Mg)$ ) est en effet inférieur à 1 (Fig. 30), alors que les sources partiellement équilibrées ont  $MI > 2$  et les sources totalement équilibrées ont  $MI = 2.66$  (Giggenbach et al., 1988). De manière générale, ce faible degré d'équilibre chimique ne permet pas d'exploiter les géothermomètres basés sur les couples K-Na ou K-Mg.

L'indice de maturité augmente suivant : Carbet Echelle ( $MI \sim 0.65$ ) > Galion, Ravine Marchand 3, Ravine Goyavier 2 ( $MI \sim 0.75$ ) > Pas du Roy, Bains jaunes ( $MI \sim 0.85$ ) > 2° Chute du Carbet, Bains Chauds Matouba ( $MI \sim 0.9$ ) > Tarade ( $MI \sim 0.95$ ) > Habitation Revel ( $MI \sim 1.0$ ). L'indice de maturité n'est pas corrélé à la température des sources, mais doit refléter le temps de résidence des eaux. Par comparaison les eaux du lac Tarissan ont un indice de maturité allant de 1 à 1.4 en période de bas niveau en accord avec un temps de résidence plus long (Fig. 27).

L'indice d'équilibre de chacune des sources ne montre pas de variations importantes, à l'exception d'un **pic en 2017** (Fig. 30) qui pourrait refléter **l'injection d'eaux plus équilibrées** provenant du système hydrothermal central (Tarissan) ou profond, en accord avec l'accélération du réchauffement de certaines sources, dont Galion (Fig. 28). La pluviosité importante de l'année 2017 (6706 mm au sommet), en particulier au mois de septembre, pourrait avoir forcé une réorganisation de la circulation hydrothermale.





## > Météorologie au sommet

La station « Piton Sanner » a enregistré une pluviométrie de **3741 mm** en 2024, parmi les plus faibles enregistrées sur La Soufrière. L'apport a été assez régulier au cours de l'année, sans effet cyclonique marqué (Fig. 31). 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, la réorganisation du système hydrothermal enregistré par la composition des sources (voir ci-dessus), et les troubles du système hydrothermal de 2018.

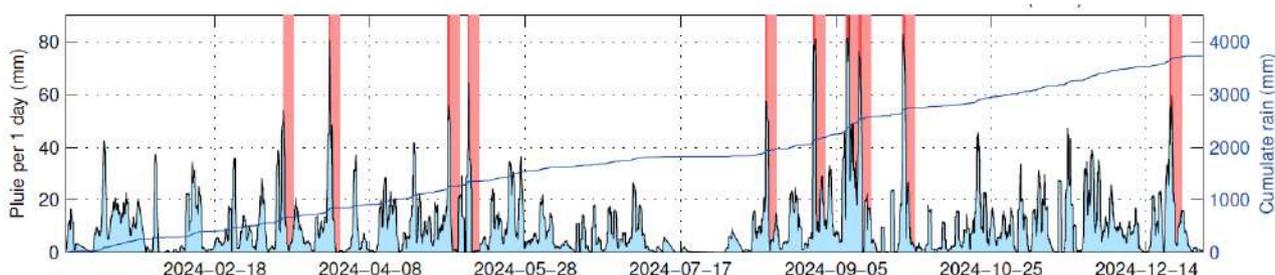


Figure 31 : Précipitations instantanées et cumulées enregistrées au sommet de la Soufrière (station Piton Sanner) au cours de l'année 2024. Les bandes rouge vif indiquent les événements avec 50 mm d'eau en moins de 24H. Pour chaque événement, une bande rouge pale indique une période de 3 jours après la fin de l'événement.

## 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 2024, l'OVSG a enregistré **1894** séismes tectoniques dans la zone surveillée (rayon approximatif de 550 km autour de la Guadeloupe). Ce nombre est plus haut que les années 2022 et 2023 (838 en 2022, 1701 en 2023) et dans la moyenne des dix dernières années (838 à 2391 séismes par année, ces dix dernières années, Fig. 32). La proportion de séismes localisés (61.5% soit 1165 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 dix 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 depuis l'année 2023. Cette meilleure localisation des petits séismes résulte de l'installation de la station sismique de Grand-Ilet en décembre 2022 et de l'installation de stations à bas bruit de fond en forage en 2024 (Savane l'Etang et Parnasse).

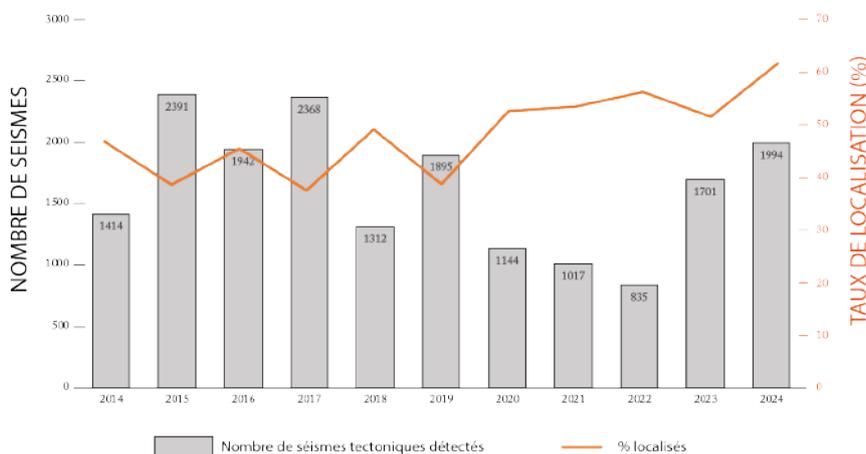


Figure 32. Nombre de séismes tectoniques détectés par le réseau de stations de l'OVSG entre 2014 et 2024 (échelle gauche) et taux de localisation (en %, échelle droite).

La **magnitude maximale (5.4)** des séismes tectoniques localisés en 2024 est dans la gamme des valeurs des dix dernières années (4.7 – 6.3). La **magnitude moyenne 2024 (1.9)** est supérieure aux valeurs 2017-2021 ( $\leq 1.7$ ) et dans la gamme de valeurs 2012-2017 (1.6 – 2.4). Notons que la grande majorité des séismes ont une magnitude comprise entre 1 et 3 (Fig. 33). Cela représente 922 séismes.

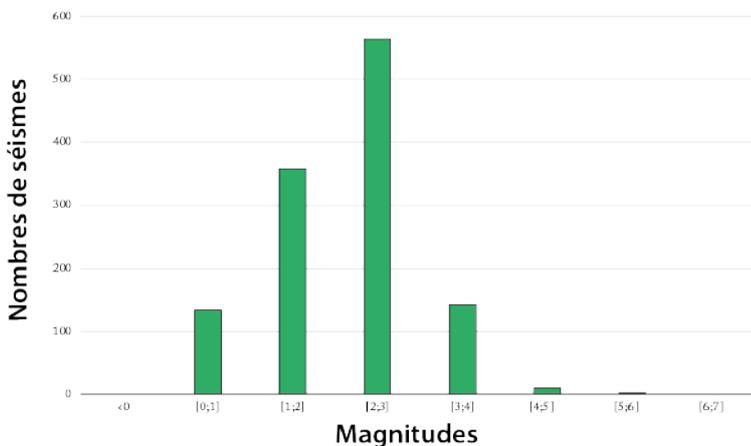


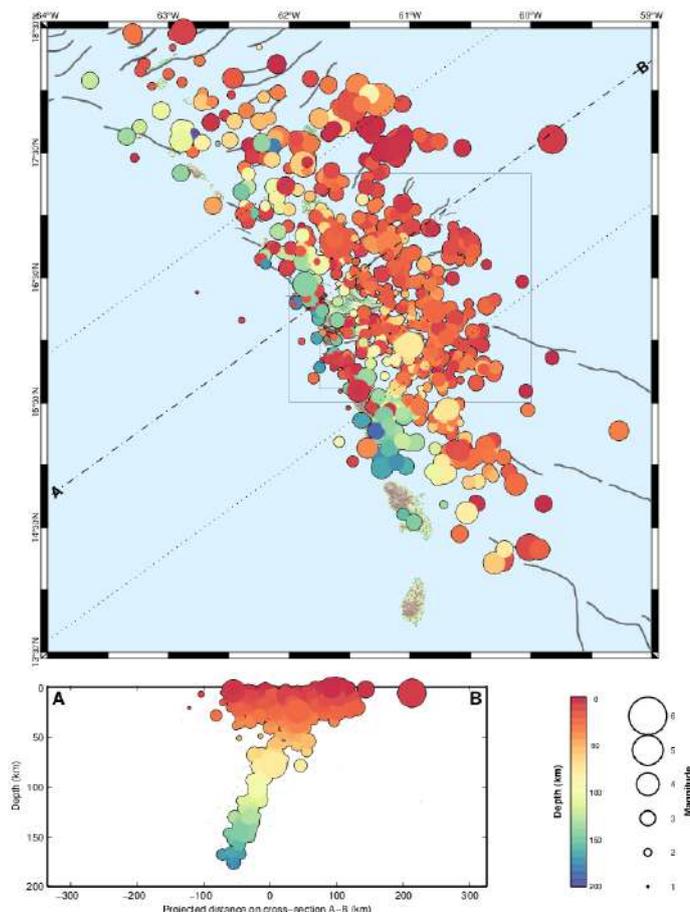
Figure 33. Histogramme des magnitudes des séismes tectoniques localisés par l'OVSG en 2024.



## Localisation

La carte de la sismicité 2024 (Fig. 34) 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 34. Hypocentres et magnitudes des séismes localisés durant l'année 2024, 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.



Seulement 7 séismes (contre 16 en 2022 et 13 en 2023) ont été ressentis en Guadeloupe et dans les îles du Nord. Ces événements ont été l'objet de communiqués auprès de la préfecture, des mairies et des médias et ont été signalés au Bureau Central Sismologique Français - BCSF (Tableau 1). La magnitude des séismes est également nettement basse pour les 10 ( $M_{10} = 4.7$ ) et 30 ( $M_{30} = 4.1$ ) séismes les plus énergétiques par rapport à l'année 2023 ( $M_{10} = 5.5$  et  $M_{30} = 4.9$ ).

Date	Magnitude	Profondeur (km)	Épicentre	Intensité max (*)
18/02/2024	2.5	8	8 km au nord de Deshaies	III
09/04/2024	2.5	13	9 km au nord-ouest de Sainte-Rose	III
08/05/2024	5.4	17	36 km au nord-nord-ouest de Anse-Bertrand	VI-VII
19/05/2024	4.4	33	48 km au nord-est de Anse-Bertrand	IV
23/09/2024	4.4	143	65 km à l'ouest-nord-ouest de Deshaies	II
31/10/2024	4.5	77	25 km à l'est-nord-est de Capesterre-de-M/G	III-IV
15/11/2024	5.3	38	163 km au nord de Anse-Bertrand	III-IV

Tableau 1. Caractéristiques des séismes régionaux ressentis en Guadeloupe, à Saint-Martin et Saint-Barthélemy en 2024 : 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. Tous ces séismes ont fait l'objet de communiqués disponibles sur [www.franceseisme.fr](http://www.franceseisme.fr).



Pour chaque séisme ressenti, les personnes peuvent témoigner sur le site du Bureau Central Sismologique Français. Le ressenti de la population, couplé à la quantité et la nature des dommages observés, permettent de classer l'intensité selon une échelle dite échelle macrosismique. Pour exemple, l'estimation régionale de la secousse du 8 mai 2024, qui a été enregistré à 36 km au nord-nord-ouest de Anse-Bertrand, est présentée Fig. 35.

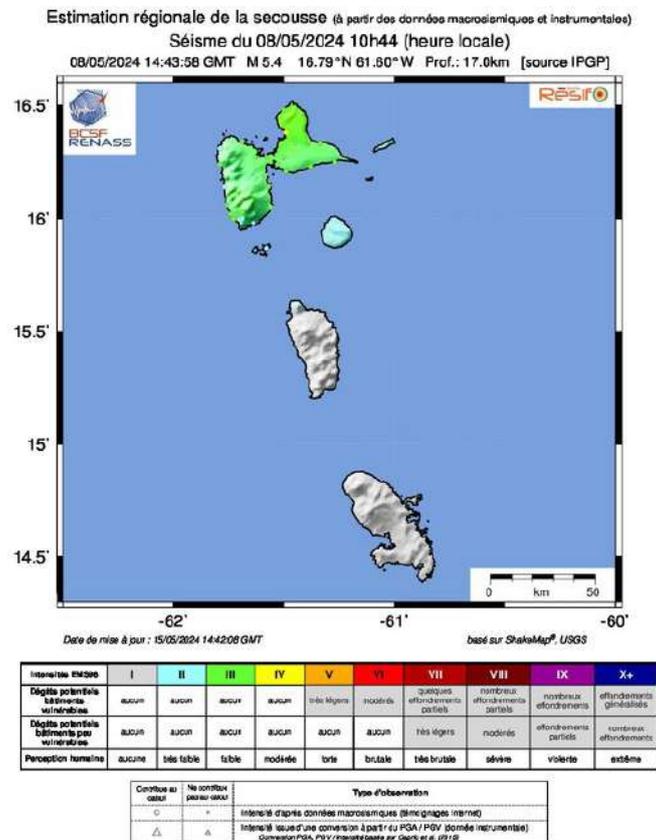


Figure 35. Estimations régionales de la secousse du 8 mai 2024 réalisée par le Bureau Central Sismologique Français à partir des données macrosismiques et instrumentales.

### > 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 2024, les réseaux de l'observatoire ont enregistré **625 séismes** dans la région des Saintes (Fig. 36). Ce nombre est proche du nombre de séismes enregistrés en 2023 (722) et se distingue de la diminution observée pendant plusieurs années (1073 séismes en 2019, 393 en 2020, 340 en 2021, 122 en 2022). Les séismes 2024 se sont produits très majoritairement à moins de 15 km de profondeur. Trois essaims sismiques ont été identifiés (Fig. 37) :

- 148 séismes les 10 et 12 juillet ;
- 20 séismes du 5 au 7 décembre ;
- 21 séismes les 30 et 31 décembre ;

Le séisme le plus important, de **magnitude 2.5**, s'est produit le 15 août 2024 à 18 km au sud-est des Saintes (Terre-de-Haut) à 2 km de profondeur. Il n'y a pas eu de témoignage de séismes ressentis. 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) ne permet pas d'exclure l'une de ces origines. 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.

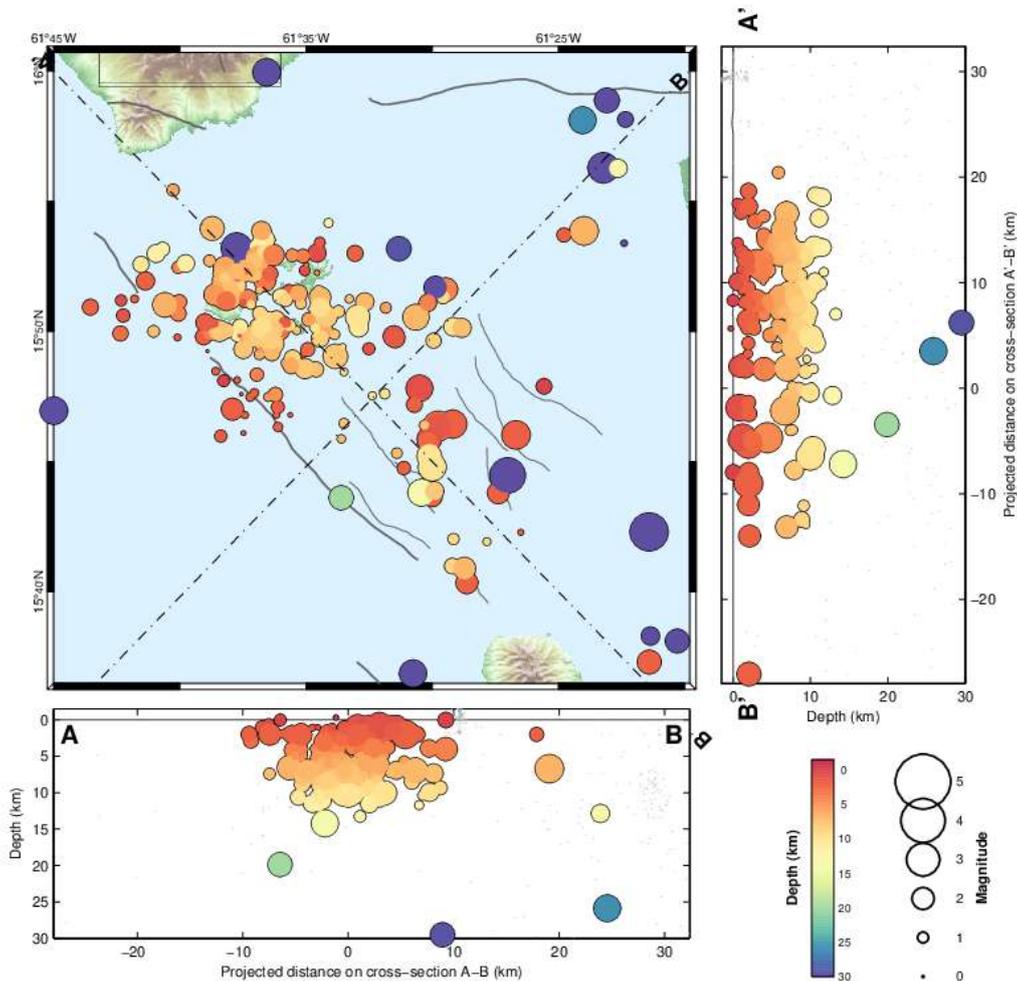


Figure 36. Hypocentres et magnitudes des séismes localisés durant l'année 2024 dans la région des Saintes. Les séismes profonds (> 25 km, bleu foncé) en relation avec la subduction de la plaque Atlantique sous la plaque Caraïbe ne sont pas visibles dans les coupes superficielles A-B et A'-B'.

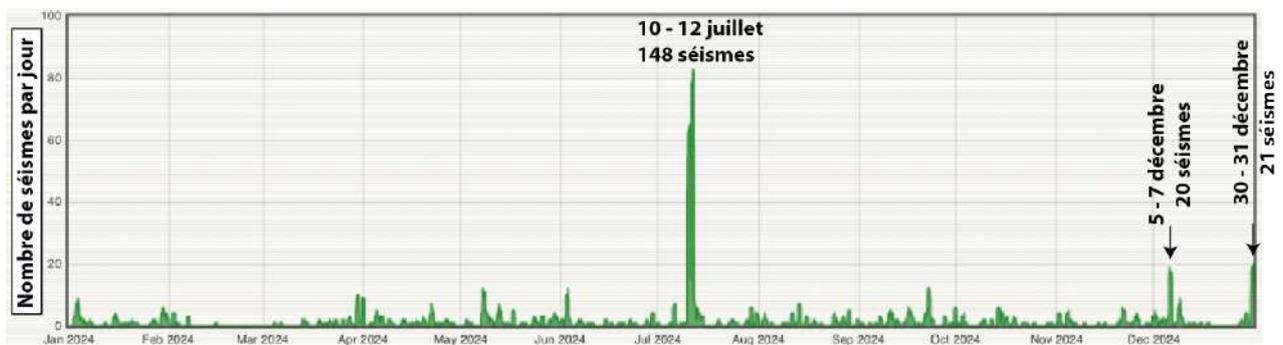


Figure 37. Taux de sismicité pour les événements de type tectonique détectés par l'OVSG-IPGP à proximité des Saintes au cours de l'année 2024 (nombre de séismes par jour). Trois essaims de séismes ont été enregistrés en juillet et décembre.



## 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 télémetrées. 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 2024 avec notamment :

- Dans le cadre de plusieurs conventions avec le Ministère de la Transition Ecologique (MTE), 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 en 2023. Deux des trois sites ont été instrumentés en 2024 et produisent actuellement des données temps réels qui participent à la surveillance opérationnelle, le dernier site devrait être installé durant le premier semestre 2025.
- Un autre projet financé par le MTE permet de mettre à jours nos serveurs informatiques 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 messenger a été poursuivi en 2024. Cet effort sur notre cœur de réseau informatique va durer jusqu'en juillet 2025.

### > 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 identifiés au niveau international : 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 télémetrées par radio UHF/VHF, WIFI, et modem 4G. Le réseau GL comprend deux types de sismomètre :

#### Sismométrie courte période

Stations :8

Interventions : interventions de maintenance préventives uniquement.

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 une acquisition numérique similaire 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.



A la suite de l'installation de la station de forage multi-paramètre de Savane l'Étang à Capesterre Belle Eau, il a été décidé d'arrêter le fonctionnement de la station voisine Dongo (DOGZ).

### 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.

En 2024, suite à des pannes nous avons réparé les stations Tarade (TAR) et Mamelle (MML), nous avons aussi envoyé le sismomètre de la station Échelle (ECH) en réparation chez le constructeur. La remise en service de cette dernière station est prévue pour le premier semestre 2025.

### **Sismométrie Régionale (VSAT : Communication satellitaire)**

Stations : 7

Interventions : 17

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. 38). 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 données des 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.

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. À Marie-Galante, nous étudions la possibilité d'une collaboration avec l'APAEI (Association des Parents et Amis des Enfants Inadaptés) pour la maintenance de la végétation sur notre site de mesure principal.

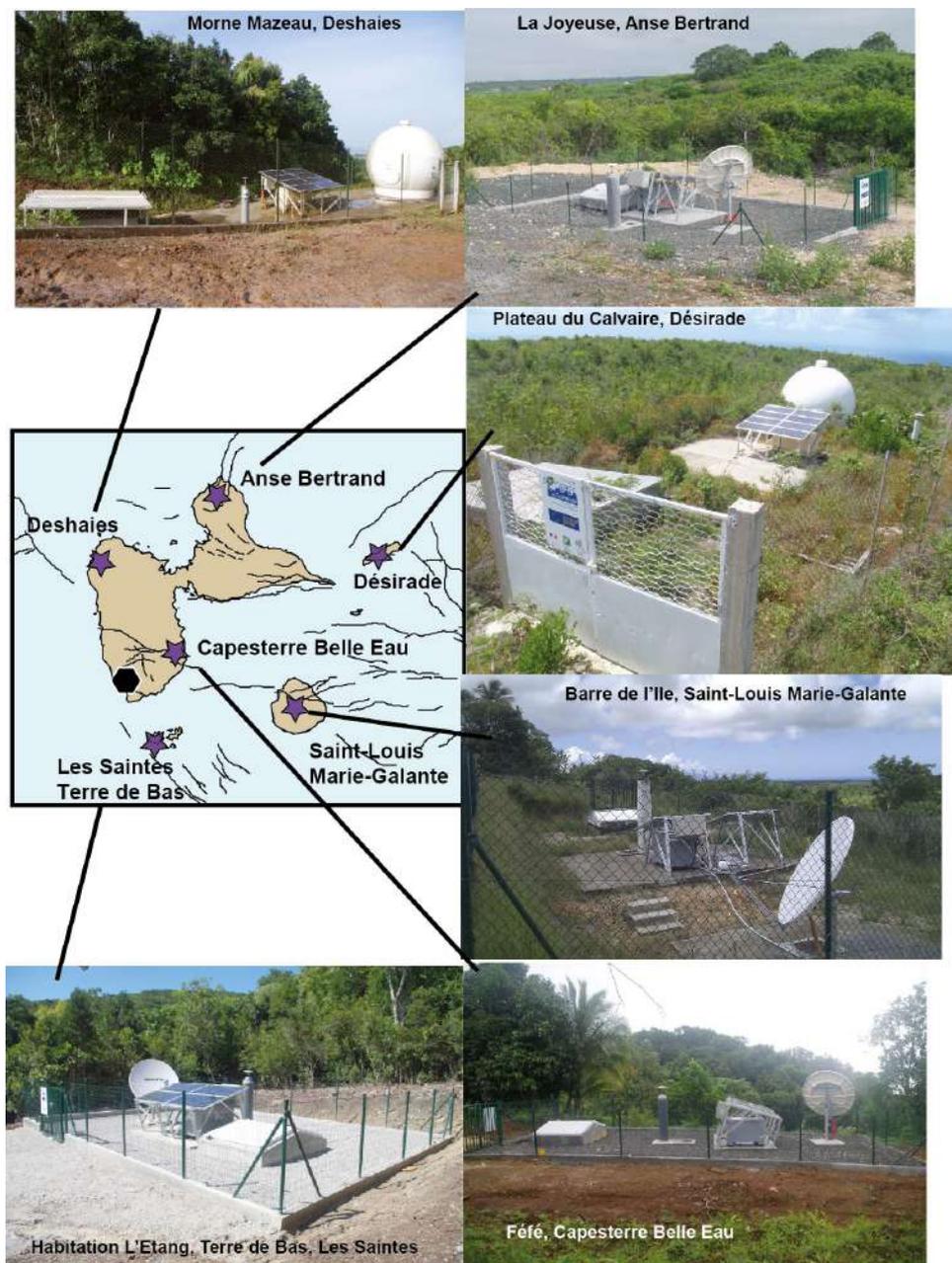


Figure 38 : Les 6 stations sismologiques et géodésiques du réseau régional installées sur l'archipel guadeloupéen

Au cours de l'année 2024, plusieurs stations ont fait l'objet d'interventions importantes:

- En décembre 2023, l'île de la Désirade a été très fortement touchée par le passage de l'ouragan Tammy. Le vent s'est engouffré à l'intérieur de la cave sismique, a arraché le système de fermeture de la trappe, et la trappe s'est ensuite empalée dans la clôture de la station. En 2024, la trappe a été réparée et un nouveau système de fermeture a été installé. Enfin, des grilles d'aération ont été installées pour prévenir le phénomène de surpression causé par le vent lors de violentes tempêtes.
- En mars 2024, le connecteur du câble du sismomètre en forage de la station Terre-de-Bas s'est désagrégé, rendant les données d'acquisition inopérantes. Pour assurer la continuité des données, un sismomètre a été temporairement installé en surface. Le câble a ensuite été réparé par le fabricant, et le sismomètre a pu être réinstallé dans son puits de forage.



- Tout au long de 2024, une importante campagne a été menée pour remplacer les batteries vieillissantes (désormais toutes âgées de plus de 10 ans) par des batteries neuves sans entretien dans les stations VSAT proches (Anse-Bertrand, Capesterre-Belle-Eau et Deshaies).

- En début d'année 2024, un problème d'alimentation est survenu sur la station Marie-Galante. Dans un premier temps, les anciennes batteries au gel ont été remplacées. Ensuite, des panneaux solaires neufs et plus puissants ont été installés. Suite à ces interventions, l'alimentation de la station est à nouveau opérationnelle.

En 2024, environ 15 ans après l'installation de la première station à Deshaies, le réseau VSAT montre des signes de vieillissement. Les clôtures de nombreuses stations sont endommagées (particulièrement à Saint-Barthélemy et à La Désirade), de nombreuses pièces mécaniques des paraboles sont rouillées et le matériel électronique et électrique se détériore. Des efforts importants ont été déployés en 2024, notamment la rénovation des batteries des stations proches et la réparation de l'analyseur de spectre, un outil indispensable au bon fonctionnement des stations. Il sera nécessaire de poursuivre ces efforts en 2025 pour que le réseau VSAT demeure pleinement opérationnel.

### Accélérométrie permanente (réseau RAP)

Stations : 18

Interventions : 15

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. Elles ont été 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](http://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. Ce réseau compte aujourd'hui 18 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 la station CDSA à l'observatoire du Houëlmont. 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, 14 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), Jarry (JARA)) 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 2024 a été marquée par :

- L'installation de la station JARA sur le site de route de Guadeloupe à Jarry,
- La maintenance curative des stations ABFA, TBPA, GBGA et THMA. Des maintenances préventives ont également été réalisées sur les autres sites
- Notre participation à la XIème édition de la Biennale du RAP qui s'est tenue à Aussois en Savoie du 20 au 22 novembre 2024



## > Réseau géodésie

La géodésie est l'étude de la forme de la terre et ses variations. Elle est très utile pour la surveillance de l'édifice volcanique ainsi que pour appréhender les mouvements à l'échelle de l'arc des petites Antilles. L'apport de nouveau magma vers la surface génère une surpression dans l'édifice volcanique qui induit des déformations mesurables en surface avant une éruption. Ces déformations peuvent engendrer des instabilités du sol qui présentent elles aussi un aléa qu'il faut prévenir. La surveillance du champ de déformations est réalisée par la mesure de déplacements relatifs de repères en surface ou de l'inclinaison du sol. Elle requiert l'intégration de plusieurs techniques offrant des caractéristiques différentes (résolution, dynamique et échantillonnage spatial et temporel). Les mesures de déformations du sol peuvent également servir à contrôler les déplacements liés à la tectonique locale, autour des failles actives ou à l'échelle de la plaque tectonique elle-même. Les récepteurs de notre réseau GNSS sont aussi utilisés comme base de référence lors de projets ponctuels portés par des organismes variés (laboratoires de recherche, IGN...).

Les mouvements en profondeur sont suivis par la gravimétrie (mesure du champ de pesanteur) qui renseigne 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 : 32 en 2024 pour maintenance et installation d'une nouvelle station

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. 39 et 40).

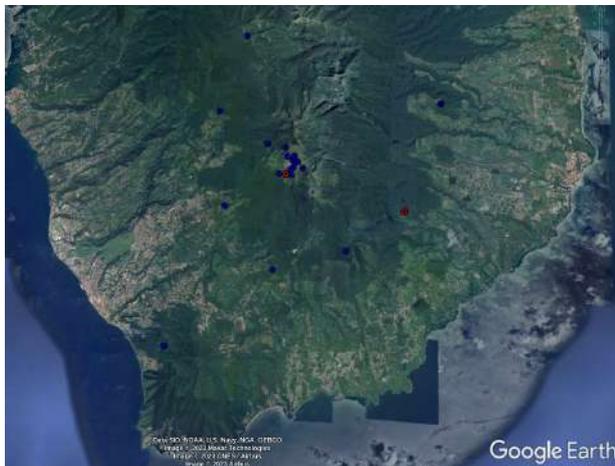


Figure 39. Carte du réseau de GNSS continus dédié à la surveillance du volcan : En bleu l'existant, en vert, le site équipé en 2024 et en rouge le site à équiper de GNSS continu en 2025.

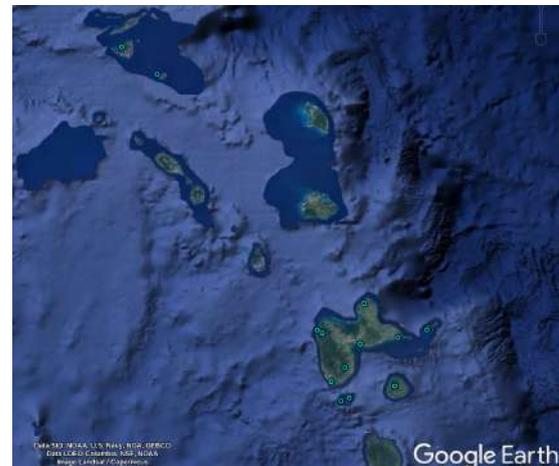


Figure 40. Carte du réseau de GNSS continus dédié à la surveillance des déformations régionales.

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, des chercheurs de l'IPGP ont réalisé des modélisations du champ de déformations de La Soufrière suite à une arrivée de matériel à différentes profondeurs (Fig. 41).

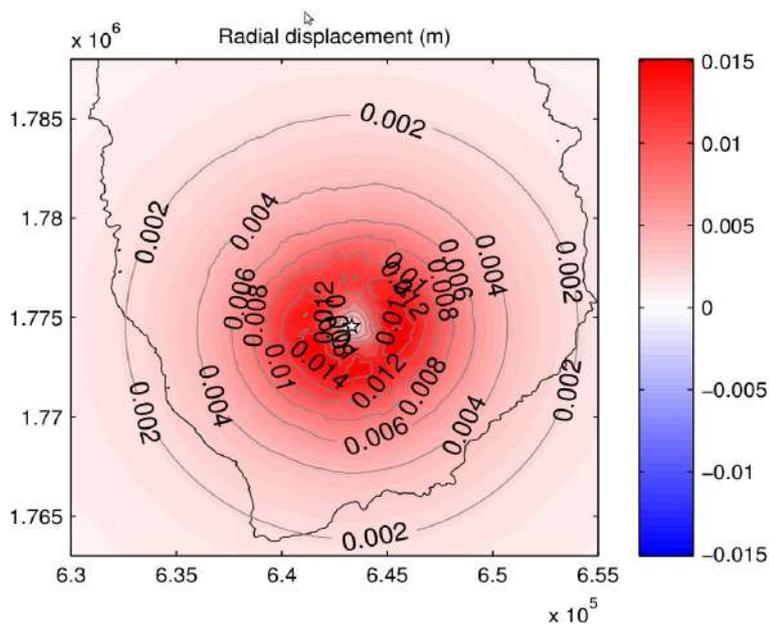


Figure 41. Déformation radiale attendue suite à l'intrusion de  $1 \cdot 10^6 \text{ m}^3$  à une profondeur de 3 km sous le dôme de La Soufrière. Le volume du dôme de La Soufrière tel qu'il apparaît actuellement est d'environ  $100 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ .

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.

En 2024 nous avons installé une nouvelle station GNSS de mesure en continu sur le site de Savane l'Étang dans le cadre du projet « forages » cofinancé par le ministère de la transition écologique (voir plus bas : projet de forages instrumentés). Dans ce projet, un dernier site situé à Savane à Mulets sera instrumenté en 2025.

### GNSS (Global Navigation Satellite System) de répétition

Sites : 57

Interventions : 82 interventions sur 41 sites différents

La campagne de mesure a porté sur le réseau de répétition autour du volcan (35 sites) et sur le réseau de répétition régional (5 sites). Cette campagne a également initié des mesures sur le site de forage de Savane à Mulets, avant que le forage ne soit instrumenté quelques mois plus tard (début 2025).

### Extensométrie / fissurométrie

Sites : 14 sites d'extensométrie et un site de fissurométrie

Mesures : 8 campagnes de mesure en 2024

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

## 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. 42) 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>

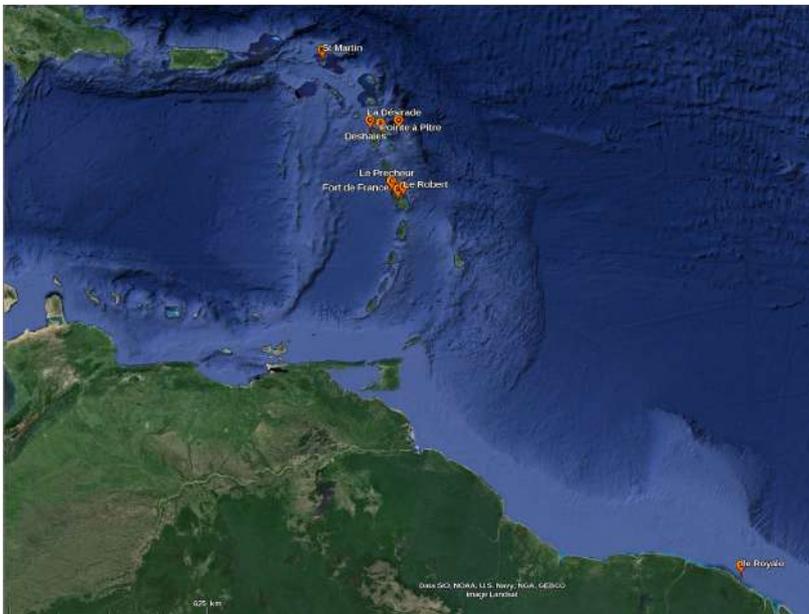


Figure 42. Le réseau français de marégraphes participant à l'alerte aux tsunamis dans les caraïbes.



## > 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 MultiGAS 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 MultiGAS. 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 2024 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. Ce système est utilisé pour chaque prélèvement de condensats de la fumerolle Napoléon Nord.

- Condensats dans le panache

Les condensats sont collectés passivement 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 Tarissan

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 lac Tarissan est prélevé mensuellement. Des tests ont été réalisés à l'aide d'un dispositif spécifique en téflon, pour tenter de prélever la phase liquide du fond du lac. Le système de poulies, très exposé aux vapeurs acides ( $pH < 1$ ) émises par le lac en ébullition, a été en partie renouvelé en 2024.



Tableau 2 : principaux types de prélèvements et mesures directes réalisés en 2024 sur les sites fumeroliens

Site	Type	Type prélèvement / mesure				
		Gaz à l'évent	Condensats A l'évent	Gaz panache (MultiGAS)		Condensats panache passif « saladiers »
		Prélèvement	Prélèvement	Mesure directe ponctuelle	Mesure directe flux (traversée panache)	Prélèvement
Napoléon Nord (NAPN)	Fumerolles	• Giggerbach • N=9	• Direct • Condenseur refroidi(ELSA) • N=6	• N=9	-	• N=1
Napoléon Est NAPE1	Fumerolles	-	-	• N=9	-	-
Napoléon Est NAPE2	Fumerolles	-	-	• N=8	-	-
Napoléon Est NAPE3	Fumerolles	-	-	• N=9	-	-
Cratère Sud Nord (CSN)	Fumerolles	-	-	• N=9	• N=6	• N=1
Cratère Sud Sud (CSS)	Fumerolles	-	-	• N=7	-	• N=3
Cratère Sud Sud Petit pont (CSSs)	Fumerolles	-	-	• N= 8	-	-
Gouffre 56	Gouffre avec fumerolles	-	-	• N=8	• N=6	• N=2
Gouffre Tarissan	Gouffre avec fumerolles et lac acide	-	• N=16 (Prélèvement du lac acide)	• N=9	• N=6	• N=1
Gouffre Hammouya	Gouffre avec fumerolles	-	-	• N=3	-	-
Faille de la Ty	Fumerolles	-	-	• N=9	-	-

N : nombre de prélèvements/mesures réalisés en 2024

• 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 ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{SO}_2$ ) 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 2024, 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.

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 CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>S et SO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>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 de pluie s'infiltrant dans le massif très fissuré de la Soufrière sont progressivement chauffées et pressurisées, jusqu'à plus de 300°C et 200 bars à plus d'un kilomètre de profondeur. Ces fluides interagissent avec les gaz magmatiques de haute température (>500°C) dissolvant d'importantes quantités d'espèces soufrées et de gaz acides (HCl). En périphérie du système hydrothermal, les fluides sont fortement dilués dans le réseau hydrogéologique superficiel, produisant les nombreuses sources chaudes sur les flancs du volcan avec des températures variant entre 30 et 60°C. Mais la composition chimique de sources « garde en mémoire » les conditions présentes à l'intérieur du système hydrothermal et permet de suivre l'évolution de l'activité du volcan. La surveillance hydro-géochimique repose sur la mesure in situ de paramètres physico-chimiques (pH, température, conductivité, oxygène dissous, potentiel rédox, débit), ainsi que sur les analyses chimiques d'un échantillonnage régulier de sources sélectionnées (Fig. 43).

En 2024, quinze sites ont été échantillonnés au cours de vingt sorties (chaque sortie nécessitant 2 personnes). Neuf sites ont continué à être 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, CE, GAB, GA, RM2, RM3, 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 des éboulements et de forts épisodes pluvieux, deux sites (CC et HR) ont été purgés en réalisant l'extraction de rochers et de débris de végétations.

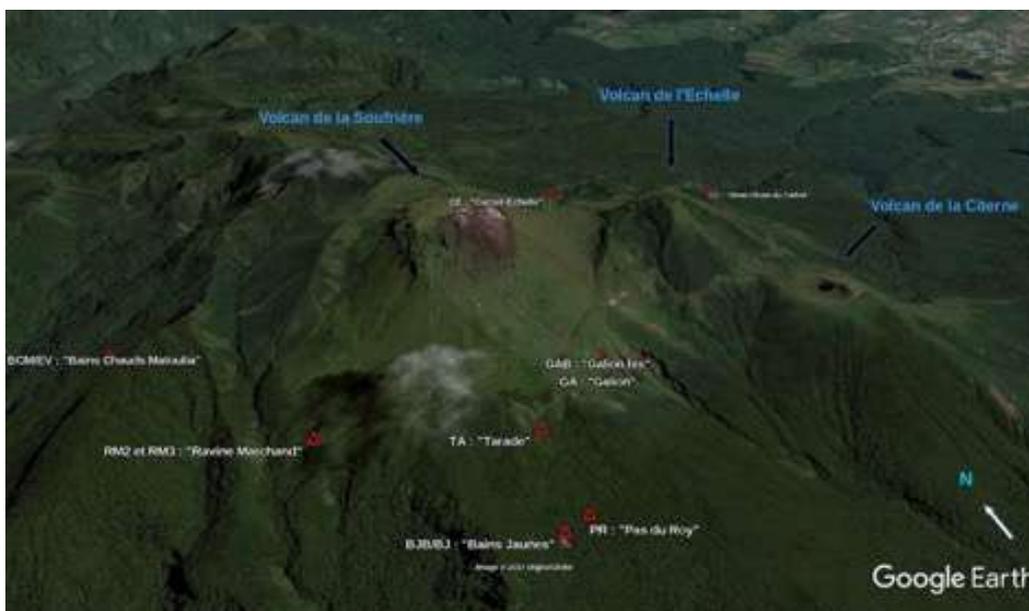


Figure 43. Localisation des principales sources hydrothermales suivies par l'OVSG – IPGP en 2024 – Image Google Earth



## > Réseau thermique et flux de CO<sub>2</sub>

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 CO<sub>2</sub> par un système de cloche embarquant un capteur. La mesure du flux de CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O que les fumerolles. Les opérations 2024 ont concerné :

- l'acquisition de sondes de température 4 fils gainées téflon pour la mesure de la température dans les fumerolles (sonde 20 m) et dans le lac Tarissan (sonde 150 m)
- le renouvellement des capteurs du système de cloche utilisé pour la mesure du flux de CO<sub>2</sub> 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 : 5

Ce réseau permet de mesurer en temps-réel les caractéristiques atmosphériques sur le massif de La Soufrière, notamment pour corriger certaines mesures géodésiques des effets météorologiques. La station du sommet (la seule station météorologique automatique télémétrée en site montagneux dans la Caraïbe), enregistre en continu plusieurs paramètres (température, pression, hygrométrie, ensoleillement, vitesse et direction du vent, pluviométrie) qui peuvent être pris en compte dans le traitement et l'interprétation des données géophysiques, géochimiques, et phénoménologiques du réseau de surveillance. Les données de cette station sont mises à la disposition de Météo France Guadeloupe et du Laboratoire de Physique de l'Atmosphère Tropicale de l'Université Antilles-Guyane, par l'intermédiaire d'un site Web en accès restreint. Le système d'alerte automatique de fortes pluies, à partir des données de cette station, est opérationnel : lorsque qu'un seuil de 50 mm de pluie en 24 heures est détecté au sommet de la Soufrière, une période de 3 jours est définie pendant lesquels certains sols sont supposés saturés en eau, et donc susceptibles d'engendrer des éboulements. Cette alerte est visible sur les graphes temps-réels de la station. Ce système est utilisé notamment pour tenter de réduire la prise de risque lorsque des travaux sont nécessaires sur le dôme de la Soufrière et sur la route de Tarade. 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 2024, la batterie a été remplacée par deux plus petites en capacité en raison de problèmes d'alimentation en énergie. À la suite d'une panne franche, le régulateur solaire a été remplacé par du neuf. Enfin, l'anémomètre est tombé en panne et son remplacement est programmé en 2025.

### **Pluviométrie Soufrière (Savane à mulet)**

Stations : 1 ;

Interventions : 1

Pour mieux suivre le bilan hydrique de La Soufrière et comprendre l'alimentation en eaux météoriques de son système hydrothermal, l'ObsERA a installé un pluviomètre début 2020 sur le site de la Savane à Mulet à côté de la station en forage. 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 pluviométrie. La transmission se fait par le biais de la transmission WIFI de la station forage de l'OVSG.



## > 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, Savane l'Étang, et Savane à Mulet) ont été réceptionnés entre le 09/09/2022 et le 24/01/2023. Les instruments installés ou à installer sur ces stations multi-paramètres sont les suivants : un sismomètre large bande, deux inclinomètres dont un de très haute sensibilité, un capteur de pression, des capteurs de température, un capteur de conductivité, une station GNSS et une station météo. La station GNSS et la station météorologique sont naturellement placées en surface et le reste des instruments seront répartis dans les deux forages : le forage de 10 m de profondeur accueille le sismomètre tandis que les inclinomètres, sondes de température et la sonde de pression sont 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. Début 2024, l'observatoire a procédé au test des trois stations complètes dans ses locaux, et à l'intégration des données issues de ces nouvelles stations aux systèmes d'acquisition et d'archivage. L'installation de la station située à Parnasse a été réalisée du 6 au 13 juin 2024 et celle de la station située à Savane l'Étang a été réalisée du 17 au 26 juin 2024 (Fig. 44). Un problème est survenu lors de l'installation de l'inclinomètre analogique. Le câble reliant le capteur au fond du puits à la station d'acquisition en surface a été endommagé, de l'eau est entrée par cette blessure et a noyé le capteur. Ce capteur a été retiré et la conception de l'encapsulation de ce capteur est actuellement revue à l'IPGP Paris. L'installation de ce capteur à Savane l'Étang et de l'ensemble de la station de Savane à Mulets est prévue pour le premier semestre 2025.



Figure 44. Haut : Installation des instruments en fond de puits à Parnasse. Droite : Installation des instruments en fond de puits à Savane l'Étang.



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

### > Acquisition, traitements et archivages des données sismologiques

Toutes les données acquises à l'observatoire qu'elles soient issues de stations automatisées ou de prélèvements réalisés à la main sont ensuite intégrées à notre système informatique pour visualisation, archivage, sauvegarde et mise à disposition des utilisateurs. L'ensemble de ces dispositifs d'acquisition, traitement, visualisation et partage des données sont décrits dans le rapport 2023 au chapitre 5. Nous mentionnons ici uniquement les points sur lesquels il y a eu un changement durant l'année 2024.

### > 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 et mineurs avec une grande précision, ce qui permettra d'avoir le maximum de réactivité en cas de crise. En 2024, 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.

Une maintenance de l'ensemble du système a été réalisée en avril 2024 par un technicien de chez Thermoscientific. Ce déplacement s'est inscrit dans une campagne mutualisée avec d'autres laboratoires en Guadeloupe. La maintenance a été à la fois curative, avec le changement de différents joints à la suite de fuites détectées en 2023, et préventive, avec le remplacement, la vérification et le nettoyage des pièces du système pour un fonctionnement optimal. Une nouvelle maintenance est à prévoir en 2026.

En 2023, nous avons connu de longues périodes de ralentissement, voire d'arrêt du fonctionnement du laboratoire de chimie des eaux, à cause des problèmes d'approvisionnement en eau courante. En avril 2024, nous avons pallié ce problème en faisant installer une citerne de 800 litres équipée d'un surpresseur qui alimente uniquement un robinet du laboratoire de chimie des eaux et le système de purification d'eau indispensable au fonctionnement du laboratoire. Ce système s'est avéré efficace mais nous avons pu constater à plusieurs reprises que la cuve est vide au bout d'environ deux mois. Une astuce consistant à alimenter la citerne en eau de pluie a permis la remise en fonctionnement du laboratoire.

#### **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. Après une période d'interruption (été 2021- automne 2022), les analyses sont à nouveau réalisées de manière régulière au sein de l'OVSG.

Le spectromètre a connu quelques problèmes techniques en 2024, avec notamment des arrêts soudains et répétés à cause du câble d'alimentation de l'onduleur. L'onduleur a ensuite été remplacé. Une perte de connexion régulière entre l'appareil et le logiciel associé a aussi été mise en évidence. Le logiciel doit être installé sur un nouvel ordinateur courant 2025.



## > 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 24h/24, 7j/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.

Le remplacement de notre parc matériel vieillissant de serveurs, stockage et réseau qui a débuté en 2023 est en cours de finalisation. Cette action est essentiellement financée par le MTE et est réalisée en collaboration avec une entreprise spécialisée dans les logiciels libres (IPEOS).

En 2024, nous avons reçu 3 serveurs, une baie de stockage, 4 commutateurs réseau 10 GbE, qui ont été mis en service par l'informaticien (AB) avec un soutien d'IPEOS pour le paramétrage logiciel des nouveaux serveurs sous *Proxmox Virtual Environment 8*. Cette société a aussi installé le logiciel de supervision informatique *Zabbix*, qui permettra à l'avenir d'améliorer la supervision réalisée actuellement avec *Nagios*.

L'infrastructure obsolète a été arrêtée : 3 serveurs de 2014, une baie de stockage Fibre Channel de 2013 et son réseau SAN de 2008.

Notre infrastructure est désormais basée sur 4 serveurs et une baie de stockage iSCSI sur réseau 10 GbE. Le stockage est réparti selon le volume et les performances d'accès souhaitables. Les systèmes des machines virtuelles et les petites données sont dans les SSD des serveurs, répliqués en temps réel par *Ceph* (architecture hyperconvergée). Les données de taille moyenne sont dans une baie de stockage 100% SSD interfacée en iSCSI, les données volumineuses, archives et sauvegardes sont dans 3 serveurs NAS avec HDD.

En 2025 nous poursuivons cet effort avec :

- L'installation et la configuration des nouveaux routeurs pare-feu de l'observatoire
- La mise en place d'un nouveau réseau sans-fil interne.

## > Système WebObs pour la recherche et la surveillance scientifique

Le système WebObs développé par F. Beauducel a été mis à jour 2 fois en 2024 et 2 fois début 2025, pour des nouvelles fonctionnalités. En particulier, depuis la version 2.7.3, dans le cas d'un séisme ressenti, un nouvel outil intégré permet de récupérer les informations du séisme (dont la carte des intensités prédites, B3) et de les transmettre simultanément et dans des formats adaptés (1) au Bureau Central Sismologique Français (BCSF) pour le déclenchement de l'enquête macrosismique, (2) aux autorités et mairies et, (3) aux médias et au public. Ce développement permet une plus grande efficacité dans la remontée d'information aux autorités, dans les délais cadrés par le plan ORSEC séismes.



## 6. Recherche et collaborations

> Projets ANR (plus récent au plus ancien)

### **UNREST : Understanding real-time moNitoRing data in terms of pre-Eruptive magmatic processes to better constrain eruption forecaSTs.**

C. Berthod, I. Vlastelic, IPGP, OVSG, UCA, ORSAY, BRGM  
Financement : ANR JCJC 2025 - 2029

Un projet de recherche focalisé sur l'étude des éruptions magmatiques passées de la Soufrière a été soumis à l'appel de l'Agence nationale de la recherche (ANR) dans l'axe scientifique **Axe G.01 - Planétologie, structure et histoire de la Terre - CE49** et sur un instrument de financement dédié aux **Jeunes chercheurs et jeunes chercheuses (JCJC)**. Ce projet a été financé à hauteur de 430 000 euros et sera réalisé **d'avril 2025 à avril 2029**.

#### **Résumé du projet :**

De nombreux efforts ont été faits afin d'anticiper l'activité éruptive des volcans en s'appuyant sur des approches telles que la surveillance sismique et géodésique, ou les variations de la composition des gaz. Cependant, il est de plus en plus indispensable de comprendre la signification de ces signaux en termes d'évolution des systèmes magmatiques en profondeur et de leur dynamique de déstabilisation. De plus, sur de nombreux volcans, il n'existe pas de bons enregistrements instrumentaux des éruptions passées, et le besoin de quantifier et d'établir les liens de causalité entre les processus magmatiques profonds et les processus éruptifs en surface est donc encore plus crucial. Ce défi est au cœur du projet UNREST, orienté vers la contribution de la pétrologie et de la géochimie pour la surveillance des réactivations des systèmes volcaniques. Dans ce projet, nous reconstruirons le système magmatique sous La Soufrière de Guadeloupe et son évolution au cours du temps, en nous appuyant sur les compositions chimiques et les propriétés physiques des produits volcaniques. Nous identifierons et caractériserons les processus magmatiques conduisant à la rupture d'un réservoir magmatique et l'ascension du magma ainsi que leur cinétique associée. Ces résultats seront ensuite modélisés en termes de signaux géophysiques pouvant être enregistrés par les réseaux de surveillance et seront appliqués sur La Soufrière de Guadeloupe. Les résultats de UNREST seront partagés avec les observatoires volcanologiques de l'arc des Petites Antilles.

Pour atteindre ces différents objectifs, le projet UNREST est divisé en 4 work-packages (Fig. 45) qui vont nous permettre de caractériser **le système magmatique ayant alimenté les éruptions de la Soufrière de Guadeloupe de la source à la surface et faire le lien avec les signaux de surface enregistrés par le réseau de surveillance de l'Observatoire Volcanologique et Sismologique de Guadeloupe**. Ces 4 work-packages auront pour objectif de répondre aux 4 questions suivantes :

- Comment les processus du manteau profond contrôlent-ils la recharge et l'évolution des réservoirs de magma et l'activité volcanique ?
- Quelle est l'architecture et la dynamique du système magmatique de La Soufrière ?
- Quelle est la cinétique de ce système magmatique ?
- Quels sont les signaux de surveillance à attendre pour chaque scénario magmatique/éruptif ?

Enfin, **les résultats du projet UNREST seront intégrés dans le Plan Orsec du volcan de la Soufrière de Guadeloupe**, défini pour les autorités, afin d'affiner les scénarios éruptifs magmatiques plausibles. De plus, **les résultats seront présentés à la population** par le biais de conférences grand public dans l'amphithéâtre du bâtiment rénové dans les prochaines années, à l'université des Antilles, à Basse Terre et à Saint Claude. Le projet impliquera une quinzaine de chercheurs issus de 6 instituts (l'OVSG-IPGP, l'IPGP, le LMV-UCA, Université Paris Saclay, le BRGM, et SEDISOR), formera 1 doctorant et recrutera un postdoctorant. En parallèle, nous avons également recruté une doctorante, **Lisa CORROTTI**, à l'Université Clermont-Auvergne. Elle est encadrée par Lucia Gurioli (UCA-LMV), Jean-Christophe Komorowski (IPGP) et Carole Berthod (OVSG-IPGP). Elle travaillera sur l'origine des changements de dynamismes syn-éruptifs afin de comprendre pourquoi certaines éruptions de la Soufrière sont composées de plusieurs phases éruptives. Ces travaux sont intégrés et soutenus par le projet UNREST. Les étudiants en thèse/postdoctorant recrutés passeront quelques mois à l'observatoire dans les années à venir.

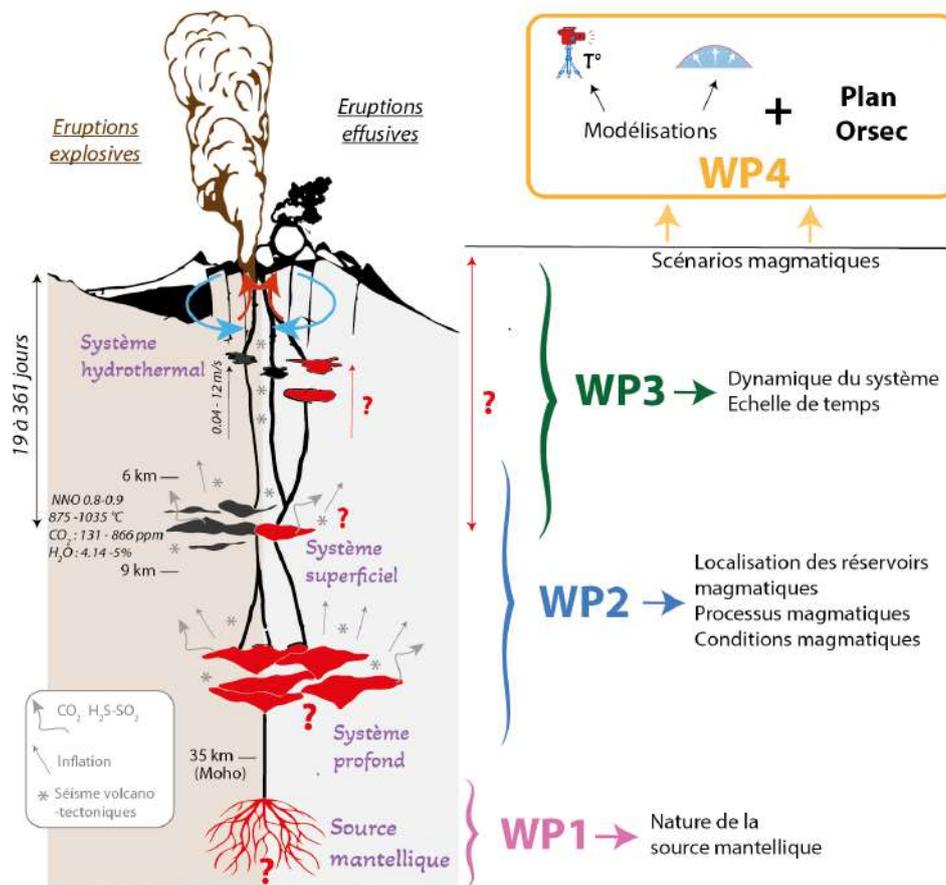


Figure 45 : Contenu des work-packages (WPs) de l'ANR JCJC UNREST

### IHYDE : Impacts on health due to long-term volcanic HYdrothermal Degassing

S. Moune, Laboratoire Magmas et Volcans, Université Clermont Auvergne (Coordination), A. Colomb (UCA/LaMP), V. Sapin (UCA/iGReD/CHU Clermont-Fd), I. Vlastelic (IPGP/OVSG), T. Benmarhnia (IRSET (EHESP/UR/INSER M/CHU Guad.))  
Financement : ANR 2025 – 2028.

Environ 10% de la population vit à proximité de volcans actifs. Un aspect commun de l'activité de la plupart des édifices volcaniques est le dégazage volcanique. Ainsi, des millions de personnes sont potentiellement exposées aux gaz volcaniques. Malgré la rareté des études sur les effets sanitaires dû à l'exposition des panaches volcaniques-hydrothermaux, leurs impacts sur la santé sont bien reconnus et il a été démontré que le dégazage persistant, passif et/ou hydrothermal peut être aussi nocif que les éruptions sporadiques. Or, l'ampleur de ces impacts est sous-estimée puisque (i) ces études se sont généralement concentrées sur les éruptions et les expositions ponctuelles, négligeant ainsi le dégazage passif continu, et (ii) l'étendue de la dispersion des gaz volcaniques n'est pas toujours prise en compte. Nous prévoyons donc de répondre à 3 questions principales : (1) Quelle est la composition chimique des gaz volcaniques émis au sommet des systèmes hydrothermaux ? (2) Comment le panache généré par les fumerolles se disperse-t-il ? (3) Quels sont les effets cardiorespiratoires résultant du dégazage hydrothermal passif ? Pour répondre à ces questions, notre projet transdisciplinaire combinera des expériences de biologie innovantes, des approches d'épidémiologie reconnues ainsi que l'état de l'art de l'échantillonnage géochimique des gaz et de la modélisation numérique. Notre objectif principal est de considérer plusieurs facteurs qui régissent l'ampleur des risques sanitaires liés aux gaz volcaniques tels que les concentrations de gaz, leur dispersion dans l'atmosphère, la durée de l'événement afin de



quantifier l'exposition de la population au dégazage hydrothermal passif. Le second objectif est de contraindre son effet potentiel sur la santé via des approches de biologie expérimentale et d'épidémiologie. Enfin, notre troisième objectif sera de transférer les connaissances scientifiques acquises dans le cadre de ce projet à la société en développant et en mettant en oeuvre des solutions durables avec et pour les communautés locales et les décideurs.

Pour répondre aux questions posées ci-dessus, le projet IHYDE propose une approche multidisciplinaire et se positionne à l'interface entre différentes thématiques : volcanologie, mathématiques, sciences de l'atmosphère, biologie, et épidémiologie. IHYDE combinera des expériences innovantes de biologie, des approches innovantes dans le domaine de l'épidémiologie, ainsi qu'une caractérisation géochimique détaillée des émanations de gaz volcaniques. De multiples facteurs gouvernent l'ampleur des risques sanitaires liés aux gaz volcaniques, tels que la concentration du panache de gaz (fonction du flux et de la concentration des fumerolles), du degré de dispersion des gaz dans l'air ambiant (par exemple, panaches générés à partir d'une source ponctuelle unique ou par plusieurs sources couvrant de vastes zones; vitesse et direction du vent) et la durée de l'événement. Le premier objectif est de prendre en compte ces paramètres afin de quantifier l'exposition de la population aux dégazage hydrothermal. Le deuxième objectif est de comprendre les effets potentiels sur la santé via des expérimentations biologiques sur les modèles cellulaires et des approches épidémiologiques. Le troisième objectif est de mettre en oeuvre une démarche transdisciplinaire pour transférer les connaissances scientifiques acquises dans ce projet à la société. Pour ce faire, le projet est organisé en 6 tâches (WP) sur deux cibles volcaniques : **La Soufrière de Guadeloupe** et le volcan Mombacho (Nicaragua). Le choix de ces cibles a été motivé par le signalement de nos partenaires locaux (OVSG, INETER). En effet, les systèmes hydrothermaux de ces deux volcans montrent actuellement une augmentation de leur activité sismique et fumerolienne. La composition des gaz fumeroliens, dominée par  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{S}$  et  $\text{HCl}$ , montre clairement l'apports de fluide magmatique dans leur système hydrothermal.

L'OVSG-IPGP est partenaire de ce projet. Le rôle de l'observatoire consiste à caractériser la composition et le flux de gaz hydrothermaux au sommet de La Soufrière de Guadeloupe, qui constitue l'un des objectifs du WP1 de IHYDE.

## **SPAGHETTI: Spectral Panoptic Analysers of Gamma rays in Hydrothermal Environments for Transport Time Inference**

Coordination : Luca Terray, Laboratoire de Physique de Clermont Auvergne, Université Clermont Auvergne  
Financement : ANR 2025 - 2028

L'année 2024 a vu le démarrage d'une nouvelle collaboration interdisciplinaire entre l'OVSG-IPGP, le Laboratoire de Physique de Clermont Auvergne (UCA-CNRS/IN2P3) et le Laboratoire Magmas et Volcans (UCA-CNRS/INSU-IRD) dans le cadre d'un projet de recherche financé par l'ANR pour une durée de quatre ans. Cette collaboration entre physicien-ne-s nucléaires et volcanologues a pour objectif de développer une nouvelle approche pour le monitoring en continu et à haute-fréquence du gaz radon ( $^{222}\text{Rn}$ ) dans l'ensemble des émissions de fluides propres aux systèmes hydrothermaux volcaniques (fumerolles, sources d'eau chaude, lacs acides, dégazage diffus du sol). L'analyse de ces fluides est fondamentale pour comprendre et surveiller les échanges de chaleur et de matière entre la cellule hydrothermale, le magma en profondeur et l'hydrosphère, qui contrôlent l'évolution de tels systèmes et leur capacité à entrer en éruption. Dans ce but, le radon est un traceur unique permettant de déterminer le temps de transport des fluides mais son utilisation en surveillance volcanique opérationnelle est très limitée car les techniques de mesure usuelles ne sont pas adaptées aux environnements agressifs des volcans. L'approche proposée est fondée sur la détection in-situ des rayons gamma émis par les descendants du radon. Le caractère très pénétrant de ces rayonnements permettra d'éviter tout contact direct entre les fluides agressifs (chauds, acides) et le capteur lui-même, et d'accroître le volume de matière analysé (1 mètre cube), entraînant un gain majeur de robustesse, de sensibilité et de résolution temporelle.

La Soufrière de Guadeloupe a été choisie pour déployer et éprouver les prototypes des sondes SPAGHETTI (sondes gamma spectrales omnidirectionnelles adaptées aux conditions hydrothermales extrêmes) qui sont actuellement en cours de développement au LPCA à Clermont-Ferrand. Outre le fait que la Soufrière est un laboratoire naturel idéal pour apprendre à démêler les influences magmatiques profondes et les forçages hydrothermaux superficiels dans les signaux enregistrés en surface, le volcan présente les principaux types de manifestations hydrothermales et une longue expérience sur le monitoring du radon y a été acquise depuis 1976. Une première campagne de terrain a été effectuée sur le volcan en juin et juillet 2024 afin de caractériser et d'actualiser les concentrations et flux de radon associés aux principales zones d'émission. Les résultats sont actuellement en cours d'analyse.



## 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 (Coordination), Caroline Martel, Institut des Sciences de la Terre d'Orléans ; Marina Rosas-Carbajal, IPGP

Financement : ANR 2023 - 2027

Le projet ANR MYGALE est un projet multidisciplinaire et collaboratif qui combine des expériences en laboratoire, des mesures géophysiques et géochimiques sur le terrain et de la modélisation pour évaluer le rôle de l'altération hydrothermale sur la stabilité de La Soufrière de Guadeloupe. Le projet a débuté en 2023 et se terminera en 2027. En 2024, les travaux ont été poursuivis au laboratoire sur le terrain en collaboration avec l'OVSG :

### 1. Acquisition de données géophysiques au sommet de La Soufrière de Guadeloupe

L'un des objectifs du projet MYGALE est d'effectuer des mesures répétées de résistivité électrique pour suivre la croissance et l'évolution du système hydrothermal de La Soufrière. Le premier profil a été acquis en mai 2022. Fin avril-début mai 2024, nous avons répété ces mesures de résistivité électrique pour les comparer avec celles collectées en 2022, fournissant ainsi une mesure de l'évolution de l'altération hydrothermale au sommet de La Soufrière.

En 2024, plusieurs profils ont été acquis soit dans une orientation nord-sud (appelée V), soit dans une orientation est-ouest (appelée H), soit dans une orientation diagonale (partie nord-sud et partie est-ouest, appelée C). Une inversion 2D de la résistivité électrique sur le profil V1 (Fig. 46) est représentée sur la figure 47. A première vue, on constate une évolution significative des valeurs de résistivité électrique entre 2022 et 2024 (Fig. 47), qui pourrait être expliquée par **l'expansion de la zone d'altération hydrothermale au sommet de La Soufrière**. Ces données sont actuellement analysées de manière très détaillée. Les résultats en cours de ces travaux ont été présentés lors de la réunion de l'Union européenne des géosciences à Vienne en 2024 (Mendieta et al., 2024).



Figure 46. Localisation des profils de résistivité électrique acquis en avril et mai 2024 au sommet de La Soufrière de Guadeloupe. Le profil V1 est indiqué dans sa partie la plus méridionale.

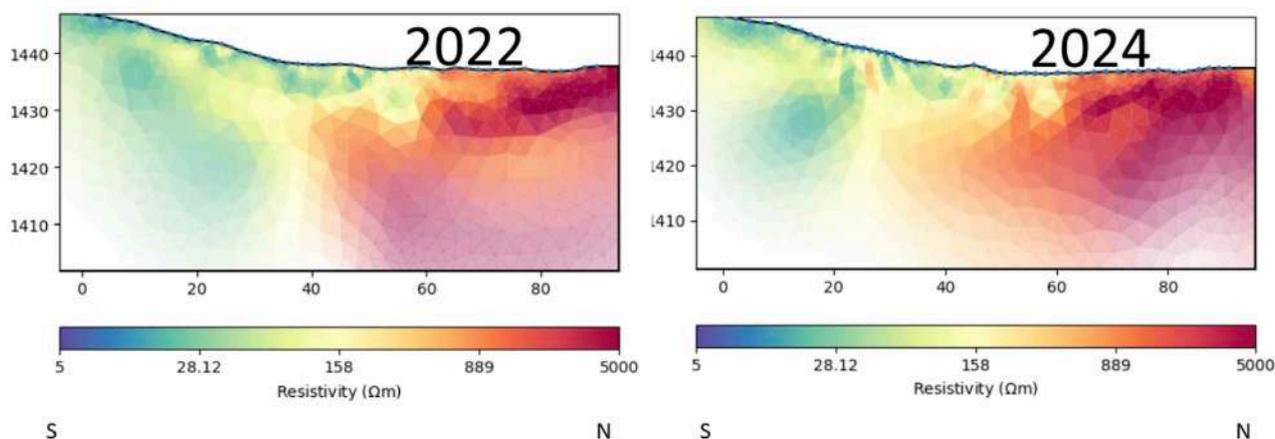


Figure 47. Comparaison des résultats préliminaires de l'inversion du profil de résistivité électrique V1 entre 2022 et 2024.

## 2. Résultats de laboratoire

Deux des autres objectifs du projet MYGALE étaient de comprendre (1) l'influence de l'altération sur les propriétés physiques des roches et (2) les délais nécessaires à l'altération. Un aperçu des travaux de laboratoire a été présenté lors d'une conférence invitée lors de la réunion de l'Union européenne des géosciences à Vienne en 2024 (Martel et al., 2024).

Au laboratoire de Strasbourg, nous avons étudié l'influence de l'altération hydrothermale sur les propriétés physiques des roches volcaniques de La Soufrière et en particulier l'hétérogénéité de l'altération et des propriétés physiques. Ces données expérimentales ont été utilisées pour calibrer les données de terrain et déduire des informations sur la stabilité de la Soufrière. Ce travail a été l'objet de la thèse d'Agata Poganj. Les résultats ont été présentés lors de la réunion de l'Union européenne des géosciences à Vienne en 2024 (Poganj et al., 2024).

Au laboratoire d'ISTO Orléans, nous avons étudié les délais nécessaires à l'altération hydrothermale. Les conditions et cinétiques des réactions d'altération hydrothermale des roches de La Soufrière ont été déterminées par des approches minéralogique (caractérisation SEM and XRD de la séquence d'altération), expérimentale (circulation de fluides dans de l'andésite dans des conditions contrôlées de pression, température, et chimie des fluides) et par modélisation thermodynamique et cinétique. Ce travail a été l'objet de la thèse de François Décossin. Les résultats ont été présentés lors de la réunion de l'Union européenne des géosciences à Vienne en 2024 (Décossin et al., 2024).

## MEGaMu - Caractérisation temporelle haute résolution des processus géothermiques utilisant conjointement l'ERT, la gravimétrie et la muographie

Coordination Simon Bouteille (IRIS INSTRUMENTS)

Financement : ANR 2020 - 2024

Contribution : J. Marteau et équipe IP2I, CNRS-IN2P3 & Université Lyon-1

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. 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.



Actuellement deux stations à muons collectent des données (Rocher Fendu et Faille du 30 août), tandis qu'une troisième attend d'être installée à proximité de la nouvelle station en forage SAV sur le parking de Savane à Mulets. Dans le cadre de l'ANR Megamu à laquelle nous avons participé, en collaboration avec IRIS Instruments, l'IPGP, Géosciences Rennes, nous avons procédé à une jouvence de l'électronique de lecture des détecteurs et au développement d'un prototype de détecteur Cerenkov permettant d'évaluer l'impulsion des particules détectées. Les deux développements ont été menés à bien et une mise en route sur site serait possible 2025.

#### > Autres projets et résultats scientifiques

#### **Thèse de doctorat de Laëticia Pantobe (2021-2024) : « Identification et modélisation des processus physiques de déclenchement et modulation de la sismicité volcanique : applications à la Soufrière de Guadeloupe »**

Direction : A. Burtin, K. Chanard, and J.-C. Komorowski

Soutenance : 19 décembre 2024

Mesurer et comprendre la dynamique de la sismicité des systèmes hydrothermaux demeure un enjeu majeur pour la surveillance et l'anticipation des éruptions phréatiques, qui sont le résultat de l'interaction entre le magma et l'eau à faible profondeur. Dans le cadre de la thèse de doctorat de Laëticia Pantobe, soutenue le 19 décembre 2024 à l'IPGP, l'étude multi-paramètres des données acquises par l'OVSG a permis d'étudier et d'identifier les forçages modulants la microsismicité de la Soufrière de Guadeloupe. Les travaux ont révélé que la microsismicité se manifeste sous la forme d'essaims de répéteurs sismiques, c'est-à-dire avec le déclenchement des mêmes séismes au cours du temps. Cette microsismicité se manifeste sous la forme d'un nombre limité de familles d'événements, où seulement 5 classes totalisent plus de 90 % du catalogue de détection depuis au moins 2014. La localisation fine des séismes volcaniques, grâce à l'utilisation d'un réseau dense de géophones déployés sur le dôme, a permis de montrer l'existence d'un conduit sub-vertical à environ 700 m sous le gouffre Tarissan (Fig. 48). Cette microsismicité a été perturbée en avril 2018 par l'occurrence d'un séisme de magnitude 4.1. Survenu à 4 km du dôme, le passage des ondes de surface générées par cet événement semble avoir endommagé l'édifice, en provoquant une augmentation de la fréquence et de l'amplitude des essaims de microsismicité. Enfin, des analyses statistiques révèlent des périodicités saisonnières dans la microsismicité, avec un pic majeur d'activité en octobre-novembre, dont la réponse au forçage périodique a augmenté après le séisme d'avril 2018.

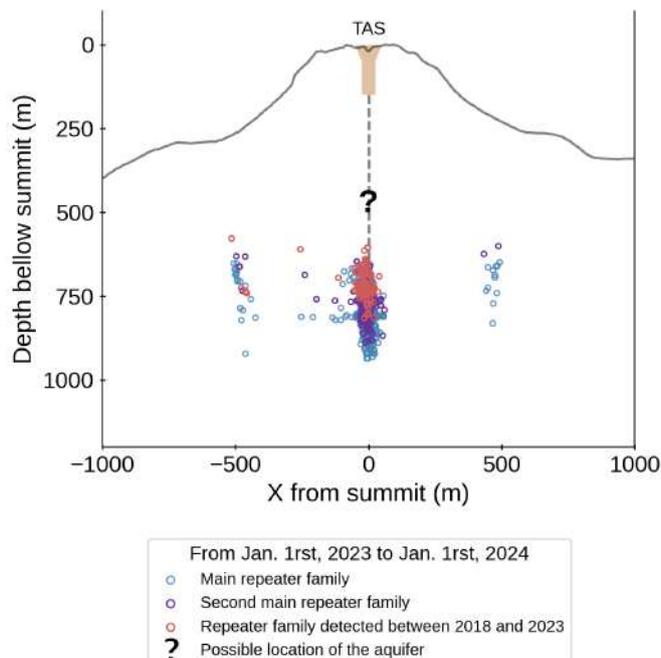


Figure 48. Localisation de la microsismicité superficielle à la Soufrière de Guadeloupe le long d'un conduit sub-vertical sous le gouffre Tarissan (TAS) durant l'année 2023. Les deux familles de répéteurs principalement détectées sont représentées en bleu et en violet. La famille de répéteurs, apparue à la suite du séisme d'avril 2018 et détectée jusqu'en décembre 2023, est représentée en rouge.



L'étude d'un lien entre hydrologie, déformation et sismicité a été explorée à travers deux modèles physiques prenant en compte, d'une part l'influence des fluctuations de la charge hydrologique en surface (remplissage/vidange du gouffre Tarissan) et, d'autre part, la réponse d'un aquifère poroélastique associée aux fluctuations de la pression de l'eau en profondeur, à la manière d'une éponge qui gonflerait en absorbant l'eau. La comparaison des déformations modélisées et observées, ainsi que le calcul de la variation de la contrainte exercée sur la fracture où la microsismicité est localisée, suggère qu'au premier ordre, la microsismicité est modulée par les variations de pression interstitielle dans l'aquifère (modèle de l'éponge, Fig. 49).

Grâce à ce travail dont une partie est déjà publiée dans une revue scientifique de rang A (Pantobe et al., 2024), il est maintenant possible de s'affranchir de l'influence des forçages environnementaux sur les séries temporelles caractérisant l'activité du volcan afin de mieux cibler les processus internes qui contrôlent l'état du système hydrothermal, et qui permettront peut-être à l'avenir d'anticiper les éruptions phréatiques.

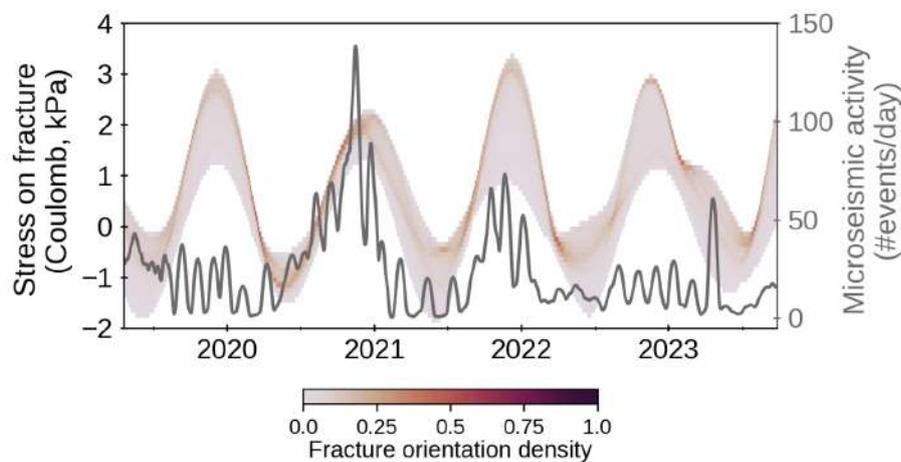


Figure 49. Nombre d'événements microsismiques détectés par jours (en gris) et variation de la contrainte de Coulomb sur la fracture où est localisée 95 % de la microsismicité, selon l'orientation de la fracture.

## Imagerie matricielle pour une photographie haute-résolution de la plomberie magmatique de la Soufrière de Guadeloupe

A. Aubry (Institut Langevin, CNRS/ESPCI Paris – PSL), A. Burtin (Institut de Physique du Globe de Paris, Université Paris Cité/CNRS)

Financement : ERC Consolidator (n° 819261) programme de recherche et d'innovation Horizon 2020 de l'Union européenne, AO-IPGP 2017, AO TelluS-INSU 2017 de l'action ALEAS, INTERREG Caraïbes V du Fonds Européen de Développement Régional

Avec le déploiement d'un réseau dense de 65 géophones pendant une période de 2 mois et l'intégration des stations sismologiques permanentes de l'OVSG, une équipe de chercheuses et chercheurs de l'Institut Langevin (CNRS/ESPCI Paris - PSL University) et de l'IPGP (Université Paris-Cité/CNRS) ont mis au point une nouvelle méthode d'imagerie, dite matricielle passive, qui plonge dans les entrailles de la Soufrière de Guadeloupe jusqu'à dix kilomètres de profondeur et résout sa plomberie interne avec une précision de l'ordre de la centaine de mètres (Giraudat et al., 2024). Cette technique permet de s'affranchir de la méconnaissance du modèle de vitesse de propagation des ondes qui est une information pré-requise pour toute imagerie sismique. Néanmoins, la mauvaise appréciation de la vitesse des ondes rend les images obtenues floues, avec une résolution dégradée et empêche leurs interprétations (Fig. 50a). L'approche matricielle permet de compenser les distorsions que les ondes sismiques subissent en traversant les différentes structures géologiques et poches de magma du volcan. Ces hétérogénéités ne sont alors plus un obstacle et une image de la structure interne du volcan est obtenue comme si ce dernier était devenu transparent. Les images, issues du traitement numérique des signaux continus de bruit de fond sismique, révèlent ainsi la forme tortueuse de la cheminée du volcan dans sa partie supérieure (Fig. 50b). Giraudat et al. (2024) confirment également l'existence d'une large zone de stockage de magma en profondeur et sa structuration en un réseau de lentilles de magma horizontales connectées entre elles. En plus de confirmer certains modèles conceptuels proposés dans la littérature, de telles images offrent



un point de vue unique sur les volcans, à même de révolutionner le champ de la volcanologie. De plus, avec un suivi temporel régulier les mouvements du magma en profondeur pourraient être détectés et ainsi anticiper de manière plus efficace les éruptions volcaniques.

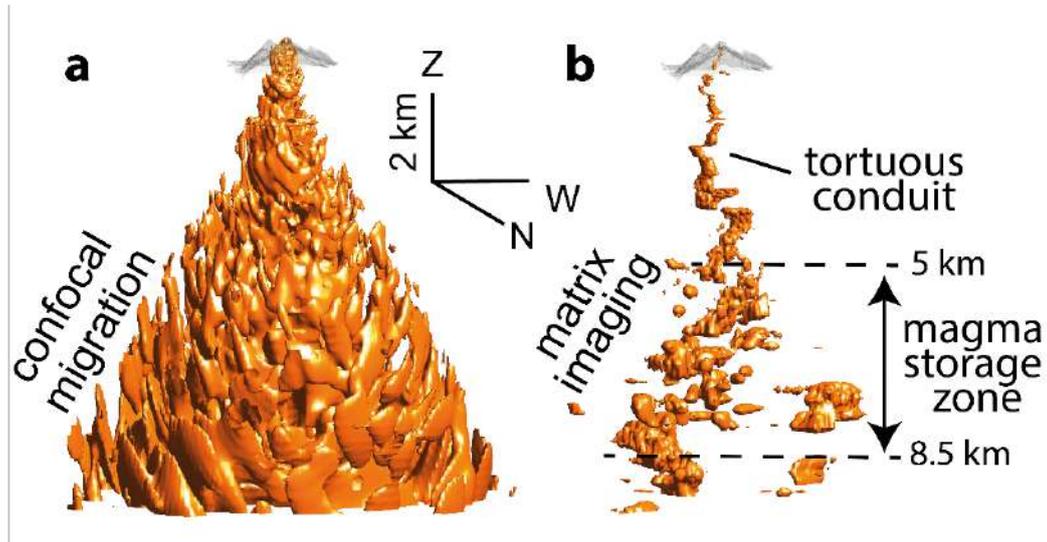


Figure 50: Imagerie matricielle de la Soufrière en Guadeloupe. a Vue tridimensionnelle du volcan obtenue par une migration confocale de la matrice de réflexion. L'image obtenue est totalement brouillée par les distorsions des ondes sismiques induites par les hétérogénéités du volcan. b Image matricielle du volcan obtenue par apprentissage des lois de focalisation compensant les hétérogénéités de ce dernier. Jusqu'à 5 km, l'image révèle le conduit tortueux de la Soufrière. Au-delà, une zone de stockage du magma est mise en lumière avec un arrangement complexe de lentilles de magma horizontales connectées les unes aux autres. (image crédit: Elsa Giraudat).

## Distribution spatiale de l'activité hydrothermale de la Soufrière et son évolution post-réactivation

A. Klein, D. Jessop, F. Donnadiou (UCA/OPGC/LMV)  
Financement Labex ClerVolc

Le projet de thèse d'Amélie Klein (2021-2024, <https://theses.fr/2024UCFA0125>) visait à caractériser les écoulements de fluides souterrains du dôme de La Soufrière et quantifier les flux de chaleur et de gaz associés afin d'aider à interpréter l'évolution du système hydrothermal depuis la réactivation. Pour mieux contraindre la distribution spatiale de l'activité hydrothermale actuelle, nous avons cartographié le dégazage diffus du CO<sub>2</sub> du sol, la température du sol à différentes profondeurs et le Potentiel Spontané de la zone sommitale au cours de la période 2022-2023 (Klein et al. 2024 ; données disponibles via <https://doi.org/10.18715/IPGP.2024.m4cvaz3d>, <https://doi.org/10.18715/IPGP.2024.m4mhzhk1>, <https://doi.org/10.25519/zhz3-tb92>). Les résultats identifient les zones de recharge de fluides ainsi que les zones et l'étendue des principaux flux hydrothermaux ascendants. Une première estimation du flux de CO<sub>2</sub> dans le sol au sommet indique  $4,20 \pm 0,86$  t/jr, soit environ la moitié des émissions de CO<sub>2</sub> des fumerolles sommitales. La vaste zone de réchauffement du sol couvre au minimum  $22250 \pm 6900$  m<sup>2</sup> ; le flux thermique total du sol calculé à  $2,93 \pm 0,78$  MW est dominé par un flux convectif de  $2,25 \pm 0,46$  MW. Les fractures sommitales proéminentes exercent un contrôle significatif sur la circulation des fluides hydrothermaux et délimitent une zone active principale couvrant 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. Le déplacement observé de la circulation des fluides souterrains vers le secteur NE peut être attribué à une perméabilité accrue du sol et peut également être lié à l'élargissement observé des failles et au glissement gravitationnel du flanc sud-ouest du dôme. Ces changements sont cohérents avec l'augmentation du dégazage et la phénoménologie observée. L'état d'étanchéité du dôme déduit de la cartographie des flux de fluides hydrothermaux peut aider à évaluer les dangers potentiels associés à la pressurisation



des fluides. Une stratégie de mesures optimisées par profils est proposée. De même, une méthodologie numérique basée sur un modèle physique est développée pour affiner les flux des principales fumerolles actives à partir d'images thermiques au sol. En parallèle, une série temporelle PS sur deux ans montre des variations diurnes et semi-diurnes liées aux marées atmosphériques et une réponse du système hydrothermal aux précipitations, à la sismicité et à la température des fumerolles. Un suivi temporel PS pluriannuel, en renforçant la télétransmission des données, permettra de mieux caractériser l'impact et les temps de réponse à ces différents facteurs.

Dans un effort conjoint OPGC-IPGP, nous souhaitons poursuivre l'imagerie thermique aérienne par drone (DJI M210 RTK) utilisée pour produire des ortho-images du sommet de la Soufrière et des sites sur ses flancs (FTY, Matylis, Ravine Claire, Breislak) depuis novembre 2021. D'une fréquence d'acquisition de 1-2/an, ces données sont disponibles via <https://doi.org/10.25519/5S7X-X334>.

## 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 et le tellure 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). 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. Au cours de ce projet de deux ans (2023-2024) des analyses de Se et Te ont été réalisées sur :

- 22 échantillons d'une douzaine de sources thermales de La Soufrière
- 15 échantillons de fluides et 3 échantillons d'argile du lac acide Tarissan
- 7 condensats de gaz de fumerolles
- 15 échantillons de gaz piégé dans de la soude (ampoule de Giggenbach)

Des analyses ont également été réalisées sur :

- 4 échantillons de lac de cratère de la Dominique (3 échantillons du « Boiling lake » et un échantillon de Cold Soufrière)
- 2 échantillons de gaz sous-marin prélevés sur les pentes de la Montagne Pelé en Martinique.

Les résultats obtenus sur ces différents types d'échantillons ont permis d'identifier des nuances de comportement entre Se, Te et S dans les systèmes hydrothermaux. Ces nuances font de la systématique S-Se-Te un outil performant pour caractériser le dégazage magmatique, le fonctionnement du système hydrothermal de la Soufrière, et son évolution actuelle (Fig. 51).

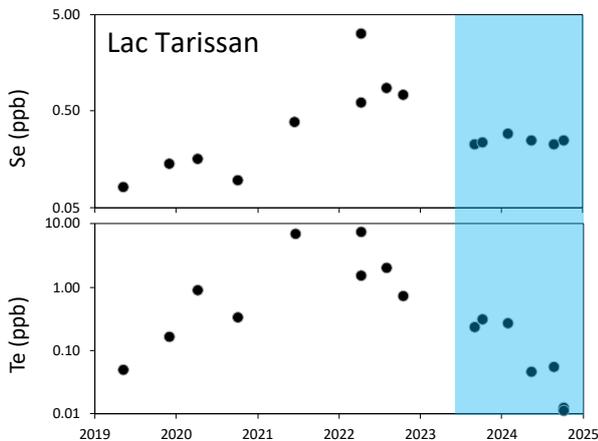


Figure 51 : Evolution des concentrations en sélénium et tellure dans le lac Tarissan entre 2019 et 2024. Jusqu'en 2022, les évolutions couplées de Se et Te reflètent l'évaporation et le remplissage du Lac. En 2023 et 2024, la concentration de Se est stable alors que celle de Te baisse de façon marquée. Cette évolution récente, sans modification majeure du pH, peut être expliquée par l'apport de condensats de gaz possédant des teneurs en Se identiques à la moyenne des eaux du Tarissan, mais des teneurs en Te bien plus faibles. Cette interprétation repose sur l'analyse des condensats de la fumerolle NapN voisine du Tarissan. Les incertitudes des mesures sont inférieures à la taille des symboles.

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

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

Financement : Etat – Région Guadeloupe – FEDER-FSE+ 2021-2027 (Contrat de Convergence et de Transformation de la Guadeloupe 2024 – 2027)

**Ce projet est inscrit au Contrat de Convergence et de Transformation de la Guadeloupe (AO 2024 – 2027). En 2024, un co-financement a été sollicité dans le cadre de l'appel à projets recherche collaboratifs thématiques au titre du programme FEDER- FSE+ 2021-2027 Région Guadeloupe. Début 2025, le plan de financement (1.2 M€) est en cours de validation par les services instructeurs de la Région Guadeloupe et du FEDER.**

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 appuierons 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 (H<sub>2</sub>S, CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>) 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, CH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>, 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 télémetrées 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 LaARGE, 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

## Simulations des impacts d'une éruption de La Soufrière de Guadeloupe

Groupe de travail national mobilisé à l'occasion de la mise à jour du plan ORSEC VOLCAN (J.-C. Komorowski, K. Kelfoun, Y. Legendre, M. Peruzzeto, T. Esposi Ongaro, O. Gillet, E. Daudet, A. Michaud-Dubuy, G. Carazzo, A. Le Friant, F. Costa, L. Gurioli, S. Moune, C. Berthod, F. Dondin, I. Vlastelic ). Rapport sur les aléas associés à l'activité de la Soufrière de Guadeloupe, adressé du SIDPC – Préfecture de Guadeloupe dans la perspective de la mise à jour 2025 du plan ORSEC VOLCAN, Décembre 2024.

Trois réunions du groupe de travail ont eu lieu en novembre et décembre 2024. Ce groupe a réalisé un travail important de modélisation des impacts de différents types d'éruptions de La Soufrière. Les modélisations des écoulements et des retombées prennent en compte un grand nombre de paramètres, dont la masse et la nature du matériel éjecté, la durée d'émission, la localisation du point d'émission. Plusieurs centaines de simulations numériques ont été réalisées afin de cartographier les probabilités d'impact dans le cas (1) d'une éruption phréatique avec effondrement partiel de flanc (Fig. 52), (2) d'une éruption magmatique multi phasée, du type de l'éruption de l'an 1530 à La Soufrière (Fig. 53).

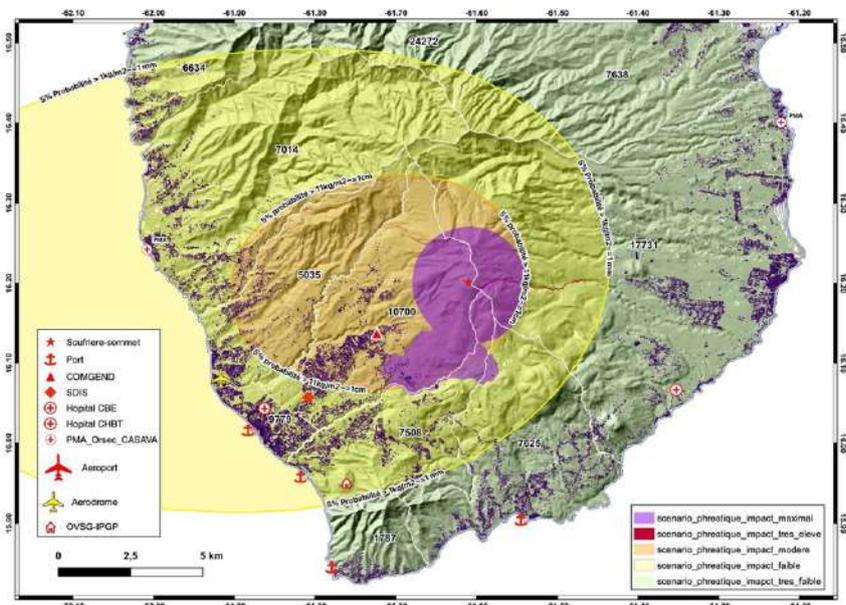


Figure 52 : Simulation des impacts dans le cas d'une éruption phréatique avec effondrement partiel de flanc

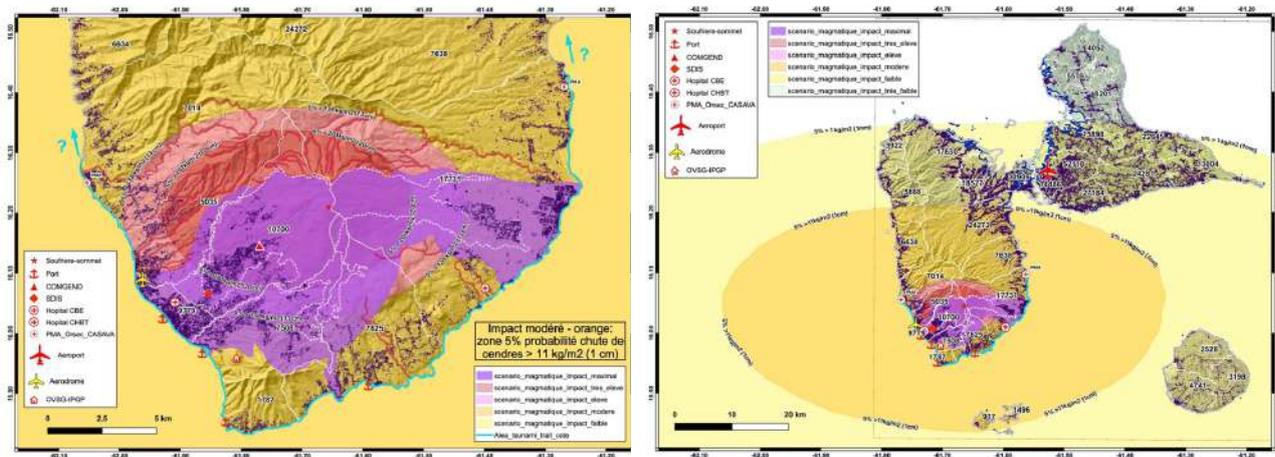


Figure 53 : Simulation des impacts dans le cas d'une éruption magmatique multiphasée (phase explosive subplinienne, phase de croissance de dôme, phase d'effondrement partiel de flanc) du type de l'éruption de l'an 1530 à La Soufrière. Gauche : détail des impacts sur la zone du sud de Basse-Terre. Droite : vue générale des impacts sur la Guadeloupe.

### > Publications

Barsotti S, Scollo S., Macedonio G., Felpeto Rielo A., Peltier A., Vougioukalakis G., de Zeeuw - van Dalen 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., Vogfjörð K. European Volcano Observatories and their use of the aviation colour code. Bulletin of Volcanology. 23 (2024) <https://doi.org/10.1007/s00445-024-01712-0>

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.

Giraudat, E., Burtin, A., Le Ber, A., Fink, M., Komorowski, J.-C. and Aubry, A. Matrix imaging as a tool for high-resolution monitoring of deep volcanic plumbing systems with seismic noise. Communications Earth & Environment 5, 509 (2024) <https://doi.org/10.1038/s43247-024-01659-2>

Klein, A., Jessop D. E., Donnadiou F., Pierre J., Moretti R. Dome permeability and fluid circulation at La Soufrière de Guadeloupe implied from soil CO<sub>2</sub> degassing, thermal flux and self-potential", Bulletin of Volcanology 86:26 (2024) <https://doi.org/10.1007/s00445-024-01713-z>

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 Mw 4.1 earthquake. Journal of Volcanology and Geothermal Research 447, <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2023.107989>.

### > Thèses soutenues

Gillet, O. (Direction E. Daudé ; J.-C. Komorowski) Modélisation et simulation des évacuations de la population basse-terrienne lors d'une crise éruptive de La Soufrière de Guadeloupe. Thèse de doctorat, Université de Rouen, 2024.

Klein, A. (Direction Donnadiou, F. Jessop, D.) Étude multi-paramétrique de l'évolution des systèmes hydrothermaux : apports à la compréhension des systèmes volcaniques en cours de réactivation. Thèse de doctorat, Université Clermont Auvergne, 2024



Pantobe, L. (Direction Burtin A., Chanard K., Komorowski J.-C.) : Identification et modélisation des processus physiques de déclenchement et modulation de la sismicité volcanique : applications à la Soufrière de Guadeloupe. Thèse de doctorat, Université Paris Cité, 2024.

#### > Conférences

Poganj, A., Heap, M. J., & Baud, P. (2024, April). Alteration and strength heterogeneity of the volcanic dome at La Soufrière de Guadeloupe (Eastern Caribbean). In EGU General Assembly Conference Abstracts.

Mendieta, A., Rosas-Carbajal, M., Bajou, R., Baud, P., Déroussi, S., Esposti Ongaro, T., ... & Heap, M. J. (2024, April). Imaging hydrothermal alteration with electrical resistivity tomography in La Soufrière de Guadeloupe volcano. In EGU General Assembly Conference Abstracts.

Décossin, F., Martel, C., Arbaret, L., Champallier, R., Penhoud, P., Azaroual, M., ... & Heap, M. (2024, April). Experimental and numerical thermos-kinetic modelling of hydrothermal alteration of volcanic rocks-Example of La Soufrière de Guadeloupe (Eastern Caribbean, France) In EGU General Assembly Conference Abstracts.

Martel, C., Décossin, F., Arbaret, L., Champallier, R., Heap, M., Rosas-Carbajal, M., & Komorowski, J. C. (2024, April). Hydrothermal alteration of lava domes: coupled contribution of experimentation and thermodynamic modelling. In EGU General Assembly Conference Abstracts (Invited).

Moune S., Rave-Bonilla Y., Jessop D., Garbin C., Moretti R. « Numerical modeling of the volcanic plume dispersion from the hydrothermal system of La Soufriere de Guadeloupe. Implication for the health of the population » . COV, Guatemala, 2024.

## 7. Autres activités

#### > Relation avec la préfecture et le SIDPC

- 16 janvier : Vœux du préfet, résidence préfectorale, Saint Claude
- 22 janvier 2024 : Restitution du projet Escape Volcano (Thèse O. Gillet sous la direction de E. Daudé, J.C. Komorowski), en présence du Directeur de Cabinet, de la Cheffe du SIDPC, des représentants de la DGSCGC, DEAL, SDIS et de la gendarmerie, Préfecture de Basse -Terre.
- 24 janvier 2024 : Accompagnement de Franck Dorge, Directeur de cabinet du préfet, et Thierry Humbert, sous-préfet au sommet de La Soufrière, pour finaliser la mise à jour de l'arrêté préfectoral réglementant l'accès à La Soufrière.
- 26 février 2024 : Déjeuner de la délégation IPGP avec Monsieur le Préfet, Xavier Lefort, résidence préfectorale, Saint Claude
- 21 mars 2024 : Exercice Carib Wave 2024, organisé par le SIDPC, le Centre Opérationnel Départemental (COD), la préfecture de Basse -Terre
- 26 mars 2024 : Réunion avec le Directeur de Cabinet du préfet, le SIDPC, le Parc National de Guadeloupe, le SDIS, la gendarmerie et la Deal pour la sécurisation des accès à La Soufrière (sécurisation de la route au niveau de Piton Tarade, codes d'ouverture des portails donnant accès aux zones réglementées du volcan)
- 17 septembre 2024 : Réunion avec le SIDPC (Céline Minatchy, Anny Crofils) sur le site de l'OVSG pour la construction du plan ORSEC TSUNAMI (S. Deroussi)
- 16 octobre 2024 : Réunion avec le SIDPC, le Parc National de Guadeloupe, le SDIS et la gendarmerie pour définir les modalités de codage des cadenas des portes donnant accès au secteur réglementé de La Soufrière.
- 20 décembre 2024 : Transmission des documents relatifs à la mise à jour du plan ORSEC VOLCAN

#### > Relation avec le Conseil Départemental

- 8 février; 21 mars 2024 et 6 juin : Réunions pour l'installation de la fibre optique à l'OVSG (Département, Orange, DGAC, Gendarmerie)
- 26 Février 2024 : Comité de liaison OVSG-IPGP — Conseil Départemental. Hôtel du département, Basse-Terre.



### > Relation avec l'Université des Antilles

- Participation aux Conseils d'Administration et aux Conseils du Pôle Guadeloupe
- 2 février 2024 : participation (I. Vlastelic examinateur) au jury d'Habilitation à Diriger les Recherches de Marie-Lise Bernard, Pointe à Pitre
- 26 mars 2024 : Réunion stratégique du consortium PARI (Politique Antilles Recherche et Innovation)
- Mars 2024 : Enseignements à l'IUT, Géosciences (L1, 9h), Tectonique – Géomorphologie – Paysage – Cartographie géologique, (C. Berthod)

### > Comités Scientifiques

- 16 octobre 2024 : Réunion du Comité d'Expert en Volcanologie (CEV) de l'IPGP pour faire le point sur l'activité accrue de La Soufrière de Guadeloupe (visio-conférence)
- 18 - 19 novembre 2024 : Assemblée Générale du Service National d'Observation en Volcanologie, Laboratoire Magmas et Volcans, Clermont-Ferrand
- 20 au 22 novembre 2024 : XIème édition de la Biennale du RAP, Aussois, Savoie
- 6 décembre 2024: Kick-off meeting de l'ANR IHYDE (Impacts on health due to long-term volcanic HYdrothermal Degassing)

### > Relations avec les autres institutions

- 12 janvier : Réunion à l'OVSG avec l'Office de l'Eau de Guadeloupe (Mr Laban, directeur, et Laure DUCREUX, Chargée des opérations de « Préservation de la ressource en eau & Eau potable »)
- 19 janvier 2024 : Vœux de Mr le Maire de Gourbeyre, Mairie de Gourbeyre
- 25 janvier 2024 : Réunion du groupe WG2 (réseaux et instrumentation) du SATCAR (S. Deroussi)
- 29 février 2024 : Participation de l'OVSG-IPGP à la commission d'enquête parlementaire, Assemblée Nationale, « Gestion des risques naturels majeurs dans les territoires d'outre-mer : Tables rondes : Connaissance, surveillance et identification des risques dans les Antilles » M. Mansour Kamardine, président. [http://videos.assemblee-nationale.fr/video.14717664\\_65e07dab38621.gestion-des-risques-naturels-majeurs-dans-les-territoires-d-outre-mer-tables-rondes--connaissance-29-fevrier-2024](http://videos.assemblee-nationale.fr/video.14717664_65e07dab38621.gestion-des-risques-naturels-majeurs-dans-les-territoires-d-outre-mer-tables-rondes--connaissance-29-fevrier-2024)
- 6 mars 2024 : Réunion au rectorat pour la présentation de la feuille de route sciences, école et société, Rectorat de l'académie de la Guadeloupe, Les Abymes (C. Berthod)
- 8 mars 2024 : Visite à l'OVSG de Mme Christine Gangloff-Ziegler, rectrice de l'académie de la Guadeloupe, accompagnée de Philippe Poggi, délégué régional académique à la recherche et à l'innovation.
- 16 mai 2024 : Rencontre avec la gendarmerie de Gourbeyre sur le site de l'OVSG.
- 14 juin 2024 ; Visite de Monsieur JANAS, premier président de la cour d'appel de Basse-Terre.
- juin 2024 : Rencontre avec les services instructeurs de la Région Guadeloupe et du FEDER
- juin 2024 : Présentation du projet d'académie 2024 – 2027 dans l'Amphithéâtre du Crédit agricole de Petit-Pérou aux ABYMES.
- 3 septembre : Réunion du groupe WG2 (réseaux et instrumentation) du SATCAR (S. Deroussi)
- 1<sup>er</sup> octobre 2024 : Participation (S. Deroussi) au Comité Régional de Programmation (CRP) des activités d'appui aux politiques publiques 2024 du BRGM (DEAL, site Saint Phy)
- 1<sup>er</sup> octobre 2024 : Participation (S. Deroussi) à la Commission Départementale des Risques Naturels Majeurs (CDRNM) organisée par le Pôle Risques Naturels (RN) de la DEAL (DEAL, site Saint Phy)
- 7 novembre 2024 : Participation à la réunion de clôture du projet READY 3, piloté par la Plateforme d'Intervention Régionale Amériques Caraïbes PIRAC (OVSG membre), Croix-Rouge française.
- 29 novembre 2024 : Participation (I. Vlastelic) au débat entre institutionnels et officiels (Préfet, SIDPC, PNG, Mairies, Gendarmerie) organisé dans le cadre de la première projection du film « La Soufrière d'hier et d'aujourd'hui », production Parc National de Guadeloupe (PNG), Saint-Claude, Basse-Terre



### > Formations, communications grand public

- Visites publiques de l'Observatoire tous les vendredis des mois de juin, juillet, août et des vacances de Noël, soit **16 dates** et **350 personnes** (C. Berthod)
- 11 mars 2024 : Accueil à l'OVSG de deux classes de seconde du Lycée Gerville Réache, Basse-Terre, rencontre pédagogique organisée par l'association ACP Environnement.
- 13 mars 2024 : Présentation de l'OVSG et de l'activité tellurique régionale dans le cadre du cycle de séminaires « Prévention et gestion de crise liée aux risques sismiques, cycloniques et volcaniques » organisé à l'occasion de la visite d'une délégation de 89 personnes de l'Institut des hautes études du ministère de l'Intérieur (IHEMI), Université des Antilles, Saint-Claude.
- 29 avril 2024 : Sensibilisation 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). Seconde session. La participation à cette sensibilisation conditionne le renouvellement des habilitations par la DRAGES.
- 6 mai 2024 : Accueil d'une classe du Collège Torahenou de Baie Mahault, présentation et visite de l'OVSG
- 4 octobre 2024 : Introduction du volcan de la Soufrière, Conférence-débat : « La Soufrière : un sujet de droit public ? » la Nuit du Droit 2024, Basse-Terre, 4 Octobre 2024
- 21 octobre 2024 : Interview pour l'Association Française du génie Parasismique (AFPS, représentée par F. Varin) dans le cadre du 20<sup>e</sup> anniversaire du séisme de 2004 des Saintes.
- 4 décembre 2024 : participation (S. Deroussi) au débat public organisé dans le cadre de la projection du film « La Soufrière d'hier et d'aujourd'hui », production Parc National de Guadeloupe (PNG), Les Abymes. <https://www.guadeloupe-parcnational.fr/fr/actualites/la-soufriere-dhier-et-daujourd'hui-au-fort-delgres>
- 13 novembre 2024 : participation (C. Berthod) au débat public organisé dans le cadre de la projection du film « La Soufrière d'hier et d'aujourd'hui », production Parc National de Guadeloupe (PNG), Fort Delgrès, Basse-Terre. <https://www.guadeloupe-parcnational.fr/fr/actualites/la-soufriere-dhier-et-daujourd'hui-au-fort-delgres>

### > Interventions dans les médias

- avril 2024 : Participation de l'OVSG au film « La Soufrière d'hier et d'aujourd'hui », production Parc National de Guadeloupe (PNG), réalisation Boris Courret (Interviews filmés à l'observatoire et sur La Soufrière)
- 3 mai 2024 : Interviews (Guadeloupe première, RCI, Cécile Rémusat AFP) dans le cadre de la mise à jour de l'arrêté préfectoral réglementant l'accès à la Soufrière de Guadeloupe.
- 10 mai 2024 : interview sur l'activité de La Soufrière de Guadeloupe, et la mise à jour de la réglementation d'accès (Amandine Ascension, AFP, Le Monde, [https://www.lemonde.fr/planete/article/2024/05/16/en-guadeloupe-la-soufriere-volcan-sous-haute-surveillance\\_6233657\\_3244.html](https://www.lemonde.fr/planete/article/2024/05/16/en-guadeloupe-la-soufriere-volcan-sous-haute-surveillance_6233657_3244.html))
- juin 2024 : Participation au film documentaire « Les 4 Fantastiques/ A l'ombre des 4 géants » sur les volcans actifs français, réalisateur Pascal CRESEGUT, productions ; Crestar Productions/La Clairière Ouest. <https://www.crestar-production.com/realisations/les-4-fantastiques>
- 13 décembre : Interview pour la diffusion de chroniques, Les Echos Weekend (C. Berthod)

### > Réseaux sociaux

La diffusion des bulletins mensuels et les communiqués exceptionnels, établis lors de séismes tectoniques ressentis et de séquences de séismes dans la zone de La Soufrière, sont transmis aux autorités, à la population ainsi qu'aux médias. Ils sont également publiés sur les réseaux sociaux par le biais d'une page Facebook et d'un groupe WhatsApp. Le groupe WhatsApp nommé « News Observatoire volcanologique et sismologique de Guadeloupe » a été créé en juin 2024 et comptait 354 membres fin 2024. La page Facebook, active depuis 2018, est suivie par 4620 personnes ou organisations. Nous enregistrons une très forte hausse du nombre de personnes qui suivent notre page puisque nous avons **1071 followers supplémentaires en 2024 (+143%)**. Ainsi, au cours de l'année 2024, 54 publications ont été publiées sur Facebook. Cela représente une couverture de 130602 personnes et une augmentation de **+ 647%**.



L'année 2024 a été marquée par plusieurs événements sur les réseaux sociaux :

Le communiqué réalisé pour expliquer la présence de fumerolles le 29 mars 2024 est la publication qui a touché le plus de personnes (**68660**). Des témoignages ont rapporté que ces fumerolles étaient visibles depuis l'ensemble de la Guadeloupe et depuis la Dominique. Ce jour-là, plusieurs personnes ont appelé l'observatoire pour se renseigner sur l'activité de la Soufrière et de nombreuses interrogations circulaient sur les réseaux sociaux. L'Observatoire a donc réalisé une publication afin de rassurer la population. Celle-ci a été reprise et largement diffusée par les autorités et les médias. 284 réactions ont été enregistrées sur cette publication et elle a été partagée 466 fois.

Notons que le partage de photos illustrant le travail de l'équipe de l'observatoire sur le terrain (exemple : sortie pour mesurer la déformation sur le volcan le 9 février, Fig. 54) et sur La Soufrière (exemple : sortie au sommet le 30 décembre) montre que la population est attentive et s'intéresse à la vie de l'Observatoire et à la surveillance de La Soufrière.

En parallèle, les communiqués pour les séismes ressentis et les séquences de séismes dans la zone de La Soufrière sont également suivis par la population. En effet, environ 12000 personnes ont consulté une publication sur un essaim sismique le 4 mai 2024 et 26606 personnes ont consulté un communiqué pour un séisme de magnitude 5.3 au large de Barbuda le 15 novembre 2024.

Enfin, les statistiques de notre page Facebook nous montrent que les visites gratuites de l'Observatoire proposées en 2024 ont également eu du succès. En effet, nous avons enregistré **306 clics sur le lien d'inscription** pour la deuxième session de six créneaux de visites de l'observatoire mi-juillet.

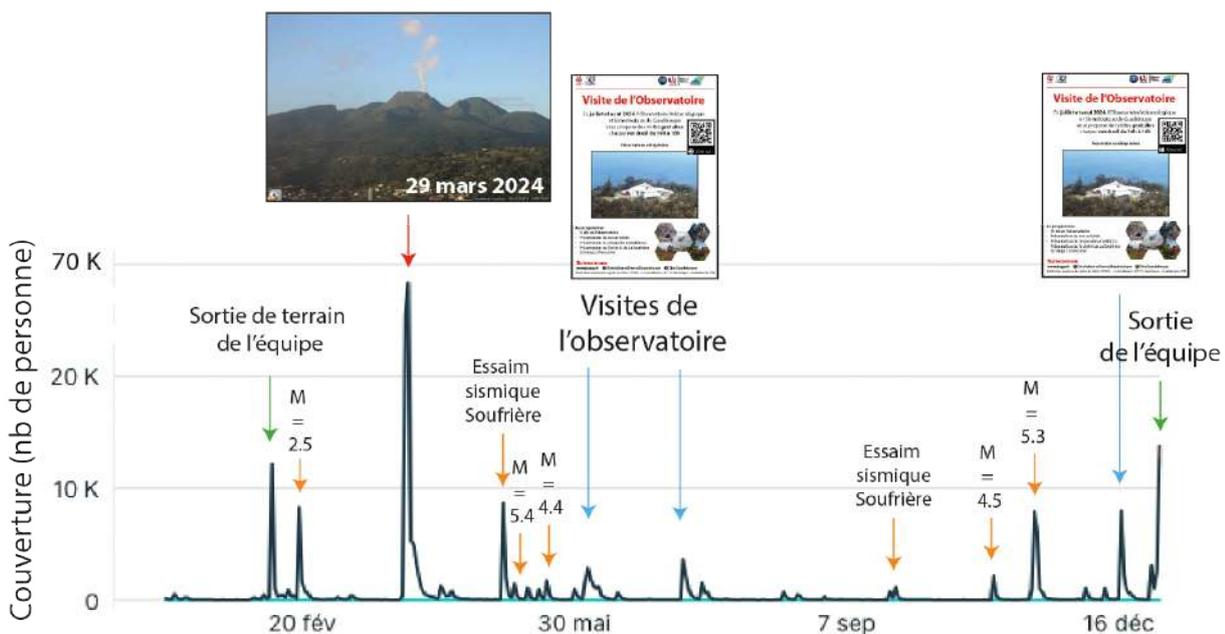


Figure 54 : Couverture de la page Facebook de l'Observatoire Volcanologique et Sismologique de Guadeloupe en 2024 associée aux différents séismes ressentis par la population, aux séquences de séismes dans la zone de La Soufrière et aux événements partagés.

#### > Stagiaires

- 22 Janvier – 26 Janvier 2024 : Stage d'immersion professionnelle d'élèves de 3<sup>e</sup> (Cynthia Adelaide, Arya Drouot, Elijah Deher)
- 3 Avril – 27 Mai 2024 : Elba Torregrosa, stage de Master 1 - IPGP « Study of Native Sulfur Spherules at the bottom of Tarissan Lake in La Soufrière, Guadeloupe » (Dir. F. Costa, I. Vlastelic)



- 6 mai – 18 juin 2024 : Sarah Dhambahadour «Thermobarométrie des gaz hydrothermaux : développement d'une méthode de résolution numérique». Stage de deuxième année de classe préparatoire INP, Valence (Dir. I. Vlastelic)
- 17-28 juin 2024 : Stages de découverte, classes de seconde, Mary Taina (Lycée Hyacinthe Bastaraud, Grand-Bourg de Marie-Galante) et Inaya Defferrard (Gerville Réache, Basse Terre)
- 25 juin – 12 août : Pierre RICHARD, Antoine KONDOR et Esteban CHAUDUN-CHEVEREAU, première année du cycle ingénieur à l'École et Observatoire des Sciences de la Terre (EOST) de Strasbourg. Stage d'initiation aux différentes techniques mises en œuvre par l'OVSG pour surveiller l'activité du volcan de La Soufrière et la sismicité régionale de l'arc des Petites Antilles.
- 1<sup>er</sup> au 31 octobre 2024 : Kathy Decorde, stage de mise en situation en milieu professionnel - France travail (structure conventionnant : pôle emploi)

#### > Visiteurs et missionnaires

- 5 février : Sarah Bazin, Institut Universitaire Européen de la Mer (IUEM)
- 29 avril – 10 mai : mission ERT ANR MYGALE (M. Rosas Carbajal, Aida Medienta, Damien Benet)
- 9 mai – 24 mai : Jean-Luc Piro, Laboratoire Magmas et Volcan, projet Cycle du Sélénium et du Tellure dans le système hydrothermal de La Soufrière de Guadeloupe (CNRS — INSU — Tellus — SYSTER 2023 – 2024)
- 3 juin – 5 juin 2024 : Mélanie Caron, responsable hygiène et sécurité, IPGP.
- 9 juin – 19 juin : Equipe IPGP pour l'installation des stations en forage, projet MTE (A. Lemarchand, P. Sakic, A. Andrieu, C. Brunet)
- 17-13 juillet : Mission ANR SPAGHETTI (L. Terray, D. Jessop, J. Lao), Laboratoire Magmas et Volcans et Laboratoire de Physique de Clermont.
- 19 septembre – 15 octobre 2024 : mission GNSS répétition, Jean-Bernard de Chaballier

#### > Hygiène et sécurité

Depuis 2024, l'OVSG compte deux assistantes de prévention : Carole Berthod et Imen Defferrard qui ont suivi une formation initiale d'assistante de prévention en début d'année 2024 à Paris. Elles sont épaulées par Mélanie Caron, conseillère de prévention de l'IPGP. Dans ce cadre, une visite a été effectuée par Mélanie les 4 et 5 juin afin de visiter les locaux de l'Observatoire, réaliser des entretiens, découvrir nos missions de terrain, et travailler sur les documentations réglementaires. De plus, 4 réunions ont été organisées avec la conseillère de prévention de l'IPGP, la conseillère de prévention du CNRS de la délégation régionale n°1 et l'ensemble des assistants de prévention de l'IPGP afin de suivre les différentes actions de prévention et aborder nos difficultés rencontrées.

En septembre 2023, l'IPGP a lancé la campagne annuelle de mise à jour de son document unique d'évaluation des risques professionnels auprès des chefs de service et des assistantes de prévention. L'OVSG a présenté un document unique pour l'année universitaire 2023/2024 ainsi qu'un programme annuel de prévention. Les actions de prévention inscrites dans ce programme et réalisées en 2024 sont présentées ci-dessous :

- **Une formation SST** a été mise en place pour l'ensemble de l'équipe de l'observatoire. Celle-ci s'est faite en deux temps : en février à Paris pour Carole Berthod et Imen Defferrard et en décembre pour le reste de l'équipe avec l'entreprise Caraïbe SST (Fig. 55). Imen Defferrard a également suivi une « Sensibilisation des agents aux Risques Psycho-sociaux (RPS) » le 4 novembre.
- **Une formation « habilitation électrique »** pour 5 personnes de l'observatoire a été programmée en août 2024. Elle a été réalisée début 2025 (Fig. 56).



Figure 55 : Formation SST 2024 de l'équipe de l'OVSG. Gauche : Geste en cas d'obstruction des voies respiratoires (adulte ou grand enfant). Massage cardiaque avec assistance du Défibrillateur Automatique Externe (DAE).



Figure 56 : Formation à l'intervention sur une tableau électrique dispensée dans le cadre de « l'habilitation électrique ».

• Un programme de renouvellement/renforcement des équipements de protection individuels (EPI) a été initié (tenues de terrain, casques, masque à gaz) (Fig. 57 & 58). L'Institut National de Recherche et de Sécurité (INRS) a été saisi afin d'aborder le sujet des EPI notamment pour la protection respiratoire et oculaire. En raison de l'augmentation de l'activité fumerolienne au sommet de La Soufrière les agents de l'OVSG-IPGP sont exposés à des **concentrations en gaz SO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S et CO<sub>2</sub> plus importantes que dans le passé**. Les mesures réalisées en 2024 indiquent que les concentrations des gaz dans l'air du sommet (H<sub>2</sub>S<sup>max</sup> entre 9 et 200 ppm et SO<sub>2</sub><sup>max</sup> entre 1.6 et 55 ppm) restent bien **au-dessus des limites d'exposition professionnelle sur 8 heures et sur 15 minutes (INRS)**. Dans cette situation, l'OVSG-IPGP a décidé d'équiper ses agents d'appareil de protection respiratoire (APR) plus protecteurs (masque facial intégral type 3M série 6000 équipé de filtres de classe 2) (Fig. 58).



Figure 57 : Logo et identité visuelle des vêtements de terrain de l'OVSG.



Figure 58 : Masque facial intégral type 3M série 6000 équipé de filtres 6099 (A2B2E2K2HgP3 R + form) (Filtre de classe 2). Ce type de filtre est adapté aux vapeurs organiques, gaz inorganiques, gaz acide, ammoniac, formaldéhyde, vapeurs de mercure et particules.

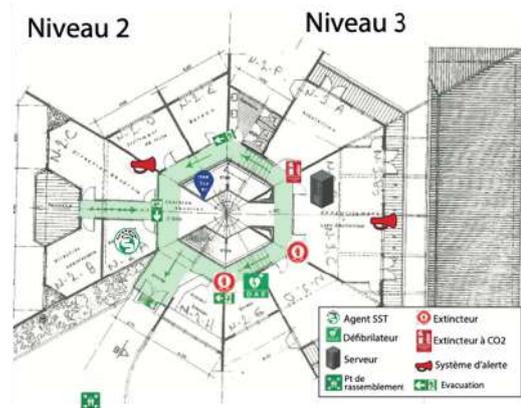


## Rapport annuel 2024

Observatoire volcanologique et sismologique de Guadeloupe - IPGP

- Le rangement de l'atelier a été réorganisé et sécurisé : les produits chimiques ont été triés et rangés dans des bacs de rétention. Les fiches de sécurité (FDS) ont été mises à jour et archivées
- **Les fiches de sécurité ont été mises à jour et affichées dans le laboratoire de géochimie des gaz.** Ce travail a été réalisé avec l'aide de 3 lycéens en seconde au Lycée Gerville-Réache en stage pendant 2 semaines à l'observatoire
- **Des plans d'évacuation** ont été mis en place à chaque étage du bâtiment et un plan d'intervention a été affiché à l'entrée de l'observatoire (Fig. 59).

Figure 59 : Aperçu du plan d'évacuation de l'OVSG. L'escalier central, zone présentant un risque incendie important au vu de l'architecture de l'observatoire, a été nettoyé et rangé. Seuls des petites cartons, utilisés pour les colis, ont été conservés.



- **Un guide d'accueil et une fiche réflexe cyclone** ont été mis à jour. Le guide d'accueil contient l'ensemble des éléments permettant de travailler à l'observatoire (numéros utiles, codes d'accès, comment se connecter au réseau, etc), des informations sur les différents dispositifs de secours, les gestes à adopter en cas de séisme et/ou d'ouragans, un inventaire des équipements à apporter sur le terrain, ainsi qu'une charte d'accompagnement des agents de l'OVSG sur La Soufrière et en Guadeloupe.

### > Vie de l'observatoire

- 16 décembre 2024 : Repas de Noël en présence d'anciens membres de l'observatoire