ISSN 2610-5101

# Rapport annuel 2022

## Observatoire volcanologique du Piton de la Fournaise - IPGP

**Institut de physique du globe de Paris, OVPF**
14 RN3 – Km 27, 97418 La Plaine des Cafres, La Réunion - www.ipgp.fr/ovpf
twitter : @ObsFournaise - facebook : ObsVolcanoPitonFournaise - youtube : Chaîne IPGP

# Sommaire

1. Présentation de l'observatoire ..... 4
> Préambule ..... 4
> Budget ..... 5
> Remerciements ..... 6
2. Personnel OVPF et accueil d'étudiants - missionnaires ..... 7
> Situation du personnel ..... 7
> Accueil de stagiaires, doctorants et missionnaires ..... 9
3. Résumé de l'activité du Piton de la Fournaise en 2022 ..... 11
4. Sismicité ..... 16
> Le réseau sismologique de l'OVPF ..... 16
> Activité sismique en 2022 ..... 18
5. Géodésie ..... 26
> Les réseau de surveillance de la déformation de l'OVPF ..... 26
> Observation des déformations en 2022 ..... 29
6. Géochimie ..... 36
> Surveillance des émissions gazeuses du massif du Piton de la Fournaise ..... 36
> Émission de $SO_2$ (Réseau DOAS « NOVAC ») ..... 37
> Mesures Multigas ..... 39
> Émissions de $CO_2$ par le sol ..... 40
> Caractérisation et suivi des émissions gazeuses sur le massif du Piton des Neiges ..... 44
> Composition des produits solides de l'éruption du 19 septembre – 5 octobre 2022 ..... 46
7. Imagerie et télédétection ..... 54
> L'INSAR (Interferometric Synthetic Aperture Radar) ..... 54
> Les images Capella ..... 55
> L'optique ..... 57
> Le Multi-spectral ..... 60
> Simulation des coulées de lave au Piton de la Fournaise ..... 65
8. Réalisations techniques et informatiques ..... 70
> Réalisations techniques ..... 71
> Réalisations informatiques ..... 89
9. Projets ambitieux au sein de l'OVPF ou en collaboration avec l'OVPF ..... 95
> Projets ANR ..... 95
> Projets européens ..... 96
> Projets OMNCG OSU-Réunion ..... 99
> Projets INSU-CNRS ..... 99
> Autres projets ..... 102

> Collaborations internationales d'échanges ..... 102
10. Sollicitations médiatiques et interventions grand public ..... 104
> Sollicitations médiatiques ..... 104
> Interventions grand public ..... 104
> Réseaux sociaux et site web ..... 107
11. Implications de l'OVPF dans le suivi de l'activité à Mayotte ..... 108
> Surveillance H24 de l'activité sismo-volcanique de Mayotte ..... 109
> Campagnes en mer ..... 114
> Projet MARMOR ..... 116
12. Implications de l'OVPF pour l'observatoire magnétique de La Réunion ..... 118
13. Publications ..... 120
> Publications dans des revues scientifiques internationales de rang A ..... 120
> Congrès scientifiques nationaux et internationaux ..... 123

*Certaines données présentées dans ce rapport ont fait déjà l'objet de publications publiques et de diffusions dans les bulletins mensuels de l'OVPF-IPGP et les communiqués exceptionnels d'activité de l'OVPF-IPGP lors des éruptions. ISSN 2610-5101*
*Ces diffusions sont à retrouver sur le site internet de l'IPGP et sur les réseaux sociaux de l'OVPF-IPGP.*

*www.ipgp.fr/ovpf / https://twitter.com/obsfournaise / https://www.facebook.com/ObsVolcanoPitonFournaise*

# 1. Présentation de l'observatoire

Observatoire volcanologique du Piton de la Fournaise – IPGP
14 RN3 – Km 27, 97418 La Plaine des Cafres, La Réunion - www.ipgp.fr/fr/ovpf/actualites-ovpf
twitter : @ObsFournaise - facebook : ObsVolcanoPitonFournaise - youtube : Chaîne IPGP

## > Préambule

L'observatoire volcanologique du Piton de la Fournaise (OVPF-IPGP) dépend de l'Institut de Physique du Globe de Paris (IPGP), grand établissement d'enseignement supérieur et de recherche. Établissement composante d'Université Paris Cité, il assure avec cette dernière ainsi qu'avec le CNRS, l'Université de La Réunion et l'IGN la tutelle de l'UMR 7154 IPGP, qui regroupe l'ensemble des activités de recherche. L'IPGP assure aussi la tutelle de l'UAR 3454 IPGP, avec le CNRS, qui regroupe toutes les activités d'observation.

Avec ses observatoires volcanologiques et sismologiques (intégrés au SNOV de l'INSU-CNRS), à la Guadeloupe (*OVSG : observatoire volcanologique et sismologique de Guadeloupe*), à la Martinique (*OVSM : observatoire volcanologique et sismologique de Martinique*), à La Réunion (*OVPF : observatoire volcanologique du Piton de la Fournaise*) et depuis 2019 à Mayotte (*REVOSIMA : réseau de surveillance volcanologique et sismologique de Mayotte*), l'IPGP assure des observations permanentes sur les systèmes volcaniques actifs français d'Outre-mer. Ces observations sont d'un grand intérêt pour développer la connaissance scientifique et participent à la prévention et à la mitigation des risques sismiques, volcaniques, de tsunami et de mouvements de terrain en France et à l'étranger. Les observatoires diffusent l'information scientifique vers les préfectures et les services de l'État (e.g. État-Major de Zone, ministères), comme vers le public. En cas de crise liée à un séisme, un tsunami ou une éruption volcanique, les observatoires contribuent auprès des préfets et des ministères à la gestion de crise, en apportant leur expertise scientifique.

Ainsi, depuis décembre 1979, date de son inauguration, l'OVPF est en charge de la surveillance de l'activité du Piton de la Fournaise (île de La Réunion). A cette mission principale, s'ajoutent deux autres missions : la recherche sur le fonctionnement et l'évolution des édifices volcaniques en général et du Piton de la Fournaise en particulier, ainsi que la diffusion des connaissances. Pour mener à bien ses missions, l'OVPF gère un parc de 108 capteurs de surveillance déployés sur 69 sites différents, dont les données sont accessibles et distribuées sur les sites web de Volobsis de l'IPGP, RESIF, EPOS et EUROVOLC.

Depuis 2020, l'OVPF a également en charge la surveillance opérationnelle de l'activité volcano-sismologique de Mayotte. En effet, depuis mai 2018, Mayotte connait une activité sismo-volcanique liée à une éruption sous-marine située à 50 km à l'est de Mayotte. La mission de surveillance de cette zone volcanique a été confiée par le cabinet du Premier Ministre et les ministères concernés à l'IPGP afin qu'il mette en place le réseau de surveillance volcanologique et sismologique de Mayotte (REVOSIMA). Ce réseau est opéré par l'IPGP avec le soutien du BRGM et est sous la responsabilité de l'observatoire volcanologique du Piton de la Fournaise et de la direction régionale du BRGM à Mayotte. Les données de ce réseau de surveillance sont produites par un large consortium de partenaires scientifiques français (IPGP et Université Paris Cité, BRGM, IFREMER, CNRS, BCSF-RéNaSS, ITES et Université de Strasbourg, IGN, ENS, SHOM, TAAF, Météo France, CNES, Université Grenoble Alpes et ISTerre, Université Clermont Auvergne, LMV et OPGC, Université de La Réunion, Université Paul Sabatier, Toulouse et GET-OMP, Université de la Rochelle, Université de Bretagne Occidentale, IRD et collaborateurs) et financées par l'État (Ministère de l'enseignement supérieur, de la recherche et de l'innovation - MESRI, Ministère de la transition écologique et solidaire - MTES, Ministère de l'intérieur - MI, Ministère des Outre-mer - MOM).

Enfin, en novembre 2022, l'observatoire magnétique de La Réunion a été installé à Bourg Murat (sur une parcelle de l'ONF) par l'observatoire magnétique de Chambon la Forêt (IPGP) en collaboration avec l'OVPF. L'OVPF maintient cet observatoire et assure les mesures ponctuelles hebdomadaires.

L'objectif de ce rapport est de présenter l'activité 2022 de l'OVPF à travers 1) l'activité volcanique du Piton de la Fournaise et de ses précurseurs, ses actions de recherche, de développement et de maintenance technique, ses actions de diffusion de la connaissance et les moyens pour y parvenir, 2) ses actions menées pour le REVOSIMA et 3) son implication dans le suivi de l'observatoire magnétique de La Réunion.

> Budget

Le budget annuel de l'OVPF est assuré principalement par l'IPGP (via des financements MESRI, MTE et CNRS), la région Réunion, le conseil départemental de La Réunion et la préfecture de La Réunion, pour un total en 2022 d'environ 1,9 million d'euros de frais de personnel et 439 750 euros de frais de fonctionnement / investissement (Tableau 1, Figure 1). A cela s'ajoutent les dotations ponctuelles sur projets de recherche ; de 75 179 euros en 2022 (cf. section 9 pour les détails sur les projets de recherche).

En détail le budget annuel 2022 :

| | Personnels permanents | Personnels non permanents | Financement récurrent surveillance | | Projets recherche |
|---|---|---|---|---|---|
| | | | Investissement | Fonctionnement | |
| **IPGP (MESRI)** | 1 132 761 | | | 35 000 | |
| **IPGP (CNRS)** | 618 521 | | 44 750 | 15 000 | |
| **IPGP (MTE)** | | | 150 000 | 75 000 | |
| **Région Réunion** | | | 90 000 | | |
| **Département Réunion** | 38 600 | | | | |
| **Préfecture Réunion** | | | | 30 000 | |
| **Projet Interreg** | | 75 311 | | | 58 586 |
| **Projet ERC** | | 38 022 | | | 3 793 |
| **Projets OSU-Réunion** | | | | | 800 |
| **Projets INSU-CNRS** | | | | | 12 000 |
| | **Totaux frais de personnel** | | **Totaux investissement/Fonctionnement** | | **Totaux projets** |
| | **1 903 215** | | **439 750** | | **75 179** |

*Tableau 1 : Tableau synthétisant le budget annuel de l'OVPF en 2022 (intégrant les financements dédiés à la surveillance REVOSIMA).*

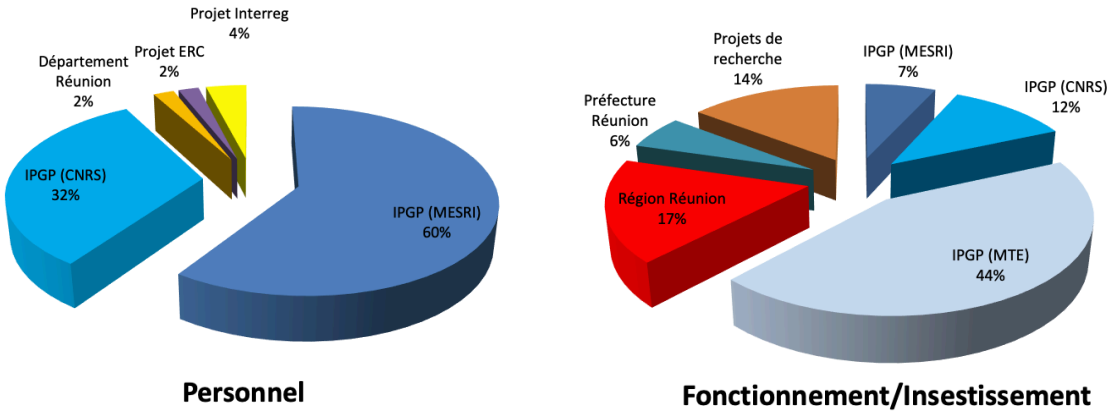


*Figure 1 : (à gauche) répartition des frais de personnel et (à droite) de fonctionnement/investissement du budget annuel 2022 de l'OVPF (incluant le fonctionnement pour la surveillance opérationnel du REVOSIMA).*

> Remerciements

Atmo-Réunion, BRGM, Cité du Volcan, CNDRS, CNES, CNRS, CNRS/INSU, CREPS, Conseil départemental de La Réunion, Collège de Cambuston, Collège de Bois d'Olive, DEAL, EDF, EDF énergies nouvelles, EMZPCOI, ENS, EOS, Gendarmerie nationale, Ifremer, IGN, INGV, IRD, IRT, ISDeform, ISTerre, ITES, LMV, Mairie du Tampon, Mairie de Sainte Rose, Mairie de Saint Philippe, Météo-France, MétéoR-OI, Musée de Villèle, ONF, OPGC, ORA, OSU-Lyon, OSU-Réunion, OVK, Parc National de la Réunion, PGHM, Préfecture de la Réunion, Région Réunion, SAG, SDIS, SEAS-OI (UR/IRD), SHOM, TAAF, Université d'Arizona, Université des Açores, Université Clermont Auvergne, Université de Gottingen, Université de Munich, Université de la Réunion, Université de Toulouse, Université de Turin, USGS…

## 2. Personnel OVPF et accueil d'étudiants - missionnaires

### > Situation du personnel

Le personnel de l'observatoire constitue une équipe mixte avec des membres rattachés à divers organismes (IPGP, CNAP - Conseil national des astronomes et physiciens, CNRS et IRD – Institut de recherche pour le développement) et présentant des profils de compétence variés (Tableau 2 ; Figure 2).

Fin 2022, le personnel était constitué de seize personnes travaillant en CDI à temps complet (Figure 2) et deux CDD recrutés dans le cadre du projet Interreg Hatari (cf. section 9 pour plus de détail sur ce projet).

| Prénom NOM | Fonction |
|---|---|
| **Équipe scientifique** | |
| Bhavani Bénard | CDD Post-doc Projet Hatari - Géochimie |
| Oryaelle Chevrel | Chargée de recherche IRD – Pétrologie, Rhéologie |
| Zacharie Duputel | Chargé de recherche CNRS - Sismologie |
| Valérie Ferrazzini | Physicienne-adjointe CNAP/IPGP – Sismologie |
| Fabrice Fontaine | Chargé de recherche CNRS - Imagerie thermique / modélisation / hydrothermalisme |
| Aline Peltier | Physicienne CNAP/IPGP – Géophysique – *Directrice* |
| Lise Retailleau | Physicienne-adjointe CNAP/IPGP – Sismologie |
| **Équipe technique** | |
| Patrice Boissier | Ingénieur d'études IPGP – Informatique – *Responsable informatique* |
| Christophe Brunet | Ingénieur de recherche CNRS – Instrumentation – *Codirecteur technique* |
| Kevin Canjamalé | Ingénieur d'études IPGP – Instrumentation |
| Philippe Catherine | Ingénieur d'études IPGP – Instrumentation |
| Nicolas Desfete | Assistant ingénieur IPGP – Instrumentation |
| Cyprien Griot | Ingénieur d'études IPGP – Informatique |
| Philippe Kowalski | Ingénieur de recherche CNRS – Instrumentation – *Directeur adjoint* |
| Frédéric Lauret | Ingénieur d'études IPGP – Instrumentation – *Codirecteur technique* |
| Frédérick Pesqueira | Assistant ingénieur IPGP – Instrumentation |
| **Gestionnaires** | |
| Luciano Garavaglia | Technicien IPGP - Gestionnaire administratif et financier |
| Laure Nepveu | CDD technicienne Projet Hatari - Gestionnaire administrative et financière |

*Tableau 2 : Personnel de l'OVPF au 31/12/2022.*

En 2022, l'équipe de l'OVPF a malheureusement perdu l'un de ses membres, Jacques Lebreton décédé en août. Jacques Lebreton était agent de maîtrise du Conseil départemental de La Réunion en poste à l'OVPF depuis 1989. Il s'occupait de la gestion des bâtiments et des espaces verts de l'OVPF, et de l'assemblage des structures métalliques des stations de surveillance de l'OVPF installées sur le terrain. Un hommage lui a été rendu par ses collègues et dans cet article : https://www.clicanoo.re/article/societe/2022/08/19/la-magie-de-la-fournaise-ne-lavait-pas-quitte

2022 a vu également la mutation d'Andrea Di Muro (Physicien CNAP, géochimiste en poste l'OVPF de 2009 à 2022, et directeur de l'OVPF de 2009 à 2013) à l'OSU de Lyon et l'arrivée d'Oryaëlle Chevrel (Chargée de recherche) affectée à l'IRD de La Réunion pour une mobilité de deux ans et hébergée à l'OVPF.

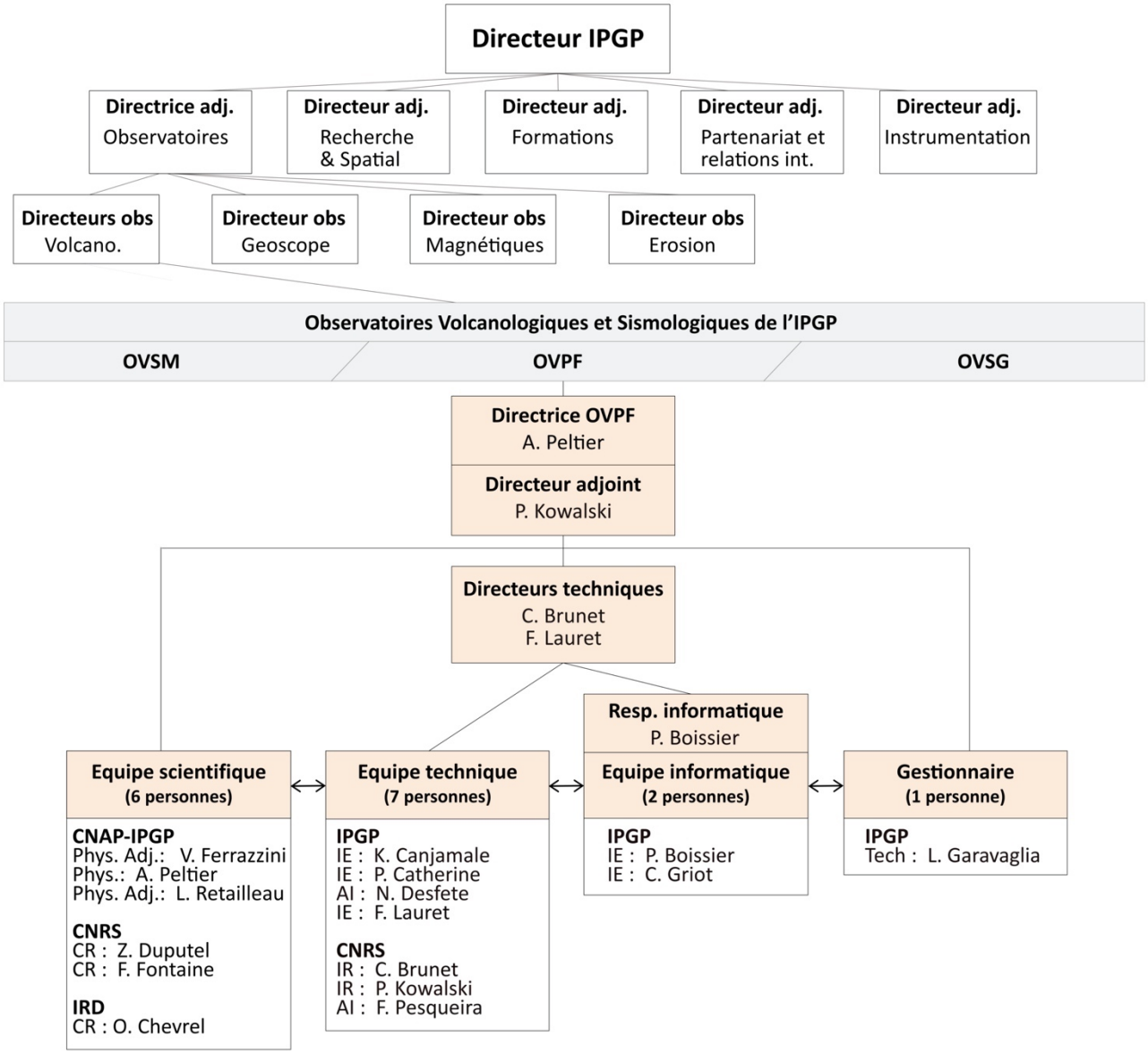


*Figure 2 : Organigramme du personnel permanent de l'OVPF au 31/12/2021.*

> Accueil de stagiaires, doctorants et missionnaires

**Accueil de stagiaires**

Dans le cadre de sa mission de formation, l'OVPF accueille tous les ans de nombreux stagiaires de tous niveaux (collèges, lycées, BTS/IUT, universités, grandes écoles).
En 2022, l'OVPF a accueilli en présentiel 7 stagiaires (Tableau 3). Tout comme en 2020 et 2021, ce chiffre est plus bas que les années précédentes compte tenu des restrictions liées à la pandémie de covid-19 qui étaient toujours en vigueur à La Réunion début 2022.

| date début | date fin | Nom | Encadrants | Niveau | Origine |
|---|---|---|---|---|---|
| 02/11/2021 | 06/05/2022 | Arthur Hauck | Fabrice Fontaine - Aline Peltier | Année césure post M1 | ENS |
| 14/02/2022 | 24/06/2022 | François Décossin | Andrea Di Muro - Aline Peltier - Bhavani Bénard | M2 | IPGP |
| 14/04/2022 | 21/06/2022 | Hugo Labrosse | Patrice Boissier - Cyprien Griot | 2ième année | IUT Annecy |
| 20/04/2022 | 20/07/2022 | Bambaouma Saidou | Andrea Di Muro | M2 | OVK Univ. Comores |
| 04/05/2022 | 06/05/2022 | Elian Bournisien | Aline Peltier | Seconde | CNED |
| 30/05/2022 | 09/07/2022 | Noa Hoareau | Frédéric Lauret | 1ere année BTS | Lycée RG Tampon |
| 12/09/2022 | 30/09/2022 | Quentin Bellune | Frédéric Lauret | Terminal | Lycée du 14ième |

*Tableau 3 : Tableau synthétisant l'accueil de stagiaires et étudiants à l'OVPF en 2022.*

**Accueil de doctorants**

En 2022, l'OVPF a accueilli 3 doctorants.

- Lise Firode
  . Sujet de thèse : Seismicity of Piton des Neiges and Piton de la Fournaise
  . Encadrants : Zacharie Duputel (OVPF-IPGP), Valérie Ferrazzini (OVPF-IPGP) et Olivier Lengliné (ITES)
  . École doctorale : ED 560 : STEP'UP, Université Paris Cité
  . Début et fin de thèse : 01/01/2022 - 31/12/2024
  . Date de séjour à l'OVPF : thèse hébergée à l'OVPF

- Cyril Journeau
  . Sujet de thèse : Analyse du transport magmatique sous les volcans actifs à partir des mesures des réseaux sismologiques et géodésiques
  . Encadrants : Nikolai Shapiro (ISTerre) et Aline Peltier (OVPF-IPGP)
  . École doctorale : ED STEP, Université Grenoble Alpes
  . Début et fin de thèse : 01/09/2019 - 23/09/2022
  . Date de séjour à l'OVPF : du 06/01/2022 au 15/04/2022, à la suite d'une précédente mission du 24/06 au 18/12/2021

- Luc Moutote (mission à l'OVPF du 21/02/2022 au 30/04/2022)
  . Sujet de thèse : Séquence de séismes pré-chocs ; Cascades aléatoires ou déclencheur asismique ?
  . Encadrants : Olivier Lengliné (ITES) et Zacharie Duputel (OVPF-IPGP)
  . École doctorale : ED413 : Sciences de la Terre et de l'Environnement, Université de Strasbourg
  . Début et fin de thèse : 01/10/2020 - 01/10/2023
  . Date de séjour à l'OVPF : du 21/02/2022 au 30/04/2022

**Accueil de missionnaires**

L'OVPF a également accueilli 29 missionnaires (enseignants-chercheurs, ingénieurs, techniciens) provenant de différents instituts et universités françaises ou étrangères (Tableau 4).

| date début | date fin | Nom | Origine |
|---|---|---|---|
| 14/03/2022 | 20/03/2022 | Luis Rivera | EOST |
| 21/04/2022 | 06/05/2022 | Lydie Gailler | LMV Clermont Ferrand |
| 21/04/2022 | 06/05/2022 | Clément Grace | LMV Clermont Ferrand |
| 21/04/2022 | 02/05/2022 | Philippe Labazuy | LMV Clermont Ferrand |
| 21/04/2022 | 02/05/2022 | Svetlana Byrdina | LMV Clermont Ferrand |
| 21/04/2022 | 02/05/2022 | Nicolas Cluzel | LMV Clermont Ferrand |
| 28/04/2022 | 06/05/2022 | Edouard Regis | LMV Clermont Ferrand |
| 28/04/2022 | 06/05/2022 | Romain Guillard | LMV Clermont Ferrand |
| 17/04/2022 | 25/04/2022 | Luis Rivera | EOST |
| 15/05/2022 | 16/06/2022 | François Beauducel | IPGP |
| 20/06/2022 | 28/06/2022 | Pascale Besson | IPGP |
| 11/07/2022 | 15/07/2022 | Telly Nduwayo | IPGP |
| 11/07/2022 | 15/07/2022 | Nathalie Okito | IPGP |
| 11/07/2022 | 15/07/2022 | Quentin Le Saec | IPGP |
| 11/07/2022 | 15/07/2022 | Pierrick Chanteux | IPGP |
| 11/07/2022 | 15/07/2022 | Laurent Pinon | IPGP |
| 01/08/2022 | 09/08/2022 | Benoit Heumez | IPGP |
| 01/08/2022 | 03/08/2022 | Pierre Sakic | IPGP |
| 10/08/2022 | 06/09/2022 | Thomas Lecocq | Observatoire royal de Belgique |
| 28/09/2022 | 26/10/2022 | Moussa Mogne Ali | CNDRS/OVK |
| 30/09/2022 | 18/10/2022 | Eva Eibl | Université de Potsdam |
| 30/09/2022 | 18/10/2022 | Daniel Vollmer | Université de Potsdam |
| 30/09/2022 | 18/10/2022 | Nele Vesely | Université de Potsdam |
| 31/10/2022 | 30/11/2022 | François Beauducel | IPGP |
| 21/11/2022 | 25/11/2022 | Benoit Heumez | IPGP |
| 22/11/2022 | 03/12/2022 | Lydie Gailler | LMV Clermont Ferrand |
| 22/11/2022 | 03/12/2022 | Edouard Regis | LMV Clermont Ferrand |
| 22/11/2022 | 03/12/2022 | Philippe Labazuy | LMV Clermont Ferrand |
| 22/11/2022 | 03/12/2022 | Erwan Thebault | LMV Clermont Ferrand |

*Tableau 4 : Tableau synthétisant l'accueil de missionnaires à l'OVPF en 2022.*

## 3. Résumé de l'activité du Piton de la Fournaise en 2022

L'année 2022 fut une fois encore particulièrement active au Piton de La Fournaise avec 2 éruptions à l'intérieur de la caldera de l'Enclos Fouqué (Figure 3), dont une débutée en 2021 (22 décembre), ainsi qu'une intrusion sous le sommet qui n'a pas débouché sur une activité de surface. Au total, cette activité a représenté 32 jours d'éruption sur l'ensemble de l'année 2022.

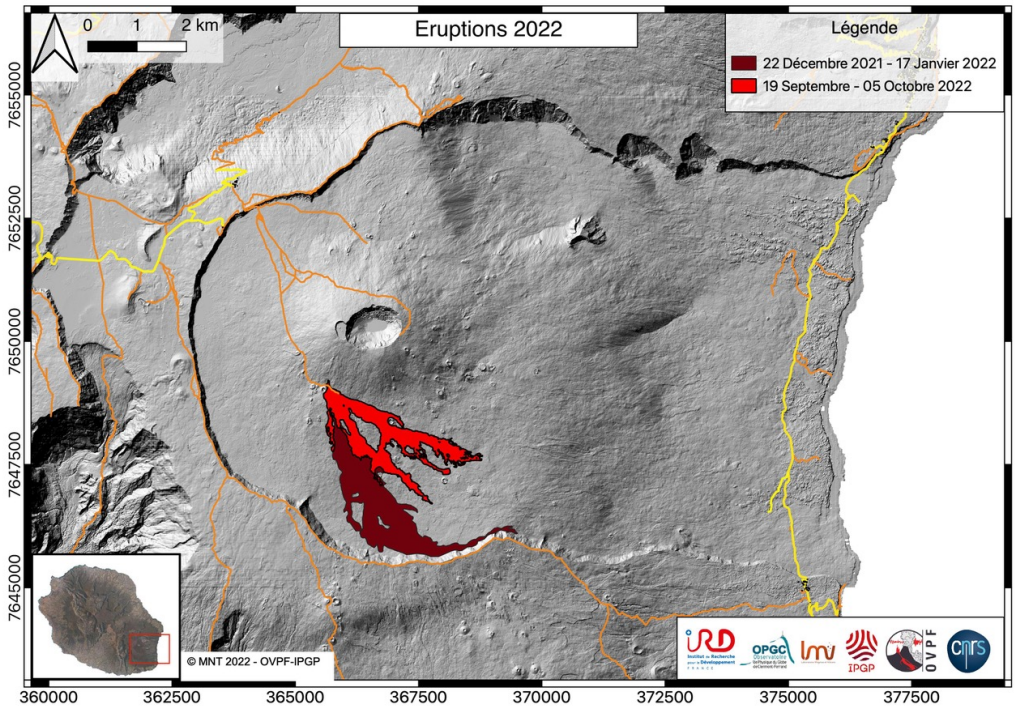


*Figure 3 : Carte de localisation des coulées de lave émises en 2022 lors de l'éruption du 22 décembre 2021 – 17 janvier 2022 (en brun) et de l'éruption du 19 septembre – 5 octobre 2022 (en rouge).*

***- L'éruption du 22 décembre 2021 – 17 janvier 2022***

L'augmentation de la sismicité superficielle sous le sommet à partir de la deuxième quinzaine de novembre 2021 et l'inflation de l'édifice volcanique qui a perduré suite à l'éruption d'avril-mai 2021, furent les témoins d'une réalimentation et d'une pressurisation du réservoir magmatique superficiel par des remontées de fluides profonds. Cette réalimentation du réservoir superficiel et sa pressurisation ont conduit à l'éruption du 22 décembre à 3h30 (heure locale, 23h30 le 21 décembre T.U. ; heure T.U. = heure locale - 4h) sur le flanc sud du volcan à l'intérieur de la caldera de l'Enclos Fouqué. L'activité éruptive fut caractérisée par l'ouverture de quatre fissures éruptives sur le flanc sud du volcan à l'intérieur de la caldera de l'Enclos Fouqué, à environ 550 m au sud sud-est du cratère Rivals pour la fissure la plus en amont (Figures 3 et 4). Très vite en fin de journée du 22 décembre l'activité se concentra en un seul point sur la fissure la plus en aval localisée à environ 2100 m d'altitude. Un cône éruptif se forma et un régime d'écoulement en tunnel de lave se mit en place en aval du cône (Figure 5).

*Figure 4 : Prises de vue du site éruptif depuis la webcam du Piton de Bert en date du 22 décembre 2021 à 05h20 heure locale (01h20 TU, à gauche) et à 05h54 heure locale (01h54 TU, à droite) (©OVPF-IPGP-IRT).*

L'éruption a pris fin le 17 janvier 2022 (02h10 heure locale, 22h10 heure T.U. le 16 janvier) après l'observation d'une chute brutale du trémor volcanique. Le volume total de lave émis en surface lors de cette éruption a été estimé à environ 10 millions de $m^3$.

*Figure 5 : Prise de vue du site éruptif depuis la webcam du Piton de Bert en date du 2 janvier 2022 à 6h00 heure locale (2h00 TU) (©OVPF-IPGP-IRT).*

Le cône principal a été baptisé « Piton Karay » par la Cité du Volcan, le Parc National de La Réunion et l'OVPF. Le choix de ce nom a été orienté par la forme en marmite hémisphérique du cône volcanique. Lors de l'éruption, il a notamment hébergé un lac de lave débordant à plusieurs reprises des bords du cratère.
Le mot Karay désigne en créole réunionnais une marmite de forme hémisphérique (similaire à un "wok") avec deux anses sur les côtés. En Inde, cet ustensile de cuisine est généralement appelé "karahi" (du sanskrit kaṭāha) qui fut par la suite créolisé en "caraye" (karay en graphie KWZ). Ce choix de nom permet également d'honorer la mémoire des engagés indiens, qui ont enrichi la langue réunionnaise avec des mots tels que Karay.

**- L'intrusion du 7 septembre 2022**

L'augmentation de la sismicité superficielle sous le sommet à partir du 28 août 2022 et l'inflation de l'édifice volcanique, qui a perduré de manière quasi continue suite à la fin de l'éruption du 22 décembre 2021 – 17 janvier 2022, furent les marqueurs d'une réalimentation et d'une pressurisation du réservoir magmatique superficiel par la remontée de magma profond. Cette réalimentation a d'abord conduit à l'intrusion du 7 septembre (16h54 heure locale).

Cette intrusion a été caractérisée par une crise sismique d'environ 2 heures et des déformations rapides de l'édifice de faible intensité. Cette intrusion correspond à un départ de magma du réservoir superficiel mais la faible pression et/ou le faible volume impliqué n'a pas permis à cette intrusion d'arriver en surface. Elle s'est arrêtée en profondeur sous le sommet.

***- L'éruption du 19 septembre – 5 octobre 2022***

Le 19 septembre 2022, à 6h23 heure locale (2h23 UTC), une nouvelle crise sismique, indiquant la rupture du toit du réservoir magmatique superficiel et de la propagation finale du magma vers la surface, a été enregistrée. Cette crise sismique fut accompagnée de déformations rapides. Très vite la localisation de la sismicité et des sources de déformation ont montré une migration du magma vers le flanc sud. Les déplacements de surface, enregistrés par méthode GPS ou interférométrie radar, ont atteint jusqu'à 40-50 cm (sur le flanc sud).

Le trémor, associé à l'arrivée du magma proche de la surface, est apparu vers 7h48 heure locale (3h48 UTC). Les cartes de trémor ont rapidement montré un maximum d'intensité sur le flanc sud, à proximité du cratère Rivals. L'activité éruptive des premières heures fut caractérisée par l'ouverture de trois fissures éruptives sur le flanc sud du volcan à l'intérieur de la caldera de l'Enclos Fouqué, au pied du Piton Kalla Pélé (Figure 6 ; voir localisation sur la Figure 3). L'activité s'est rapidement concentrée en un seul point à environ 2200 m d'altitude.

L'activité de surface a été caractérisée par la formation d'un cône éruptif érigé par l'accumulation des retombées de fontaines de lave, ainsi que par une activité en tunnel de lave mise en place rapidement en aval du cône éruptif (Figure 7). De nombreuses résurgences de coulées de lave ont été observées au toit des tunnels de lave tout au long de l'éruption.

*Figure 6 : Prise de vue du site éruptif le 19 septembre 2022 en début d'après-midi (© PGHM).*

*Figure 7 : Prises de vue du site éruptif (les dates et heures indiquées sont en heure UTC ; heure locale = heure UTC + 4) depuis la caméra de l'OVPF-IPGP-IRT située au Piton de Bert (©OVPF-IPGP-IRT).*

Le trémor, et avec lui l'activité éruptive de surface, se sont arrêtés brusquement le 5 octobre aux alentours de 10h10 (heure locale, 6h10 UTC).
Entre le 6 octobre (11h40 heure locale, 7h40 UTC) et le 7 octobre (15h heure locale, 11h UTC) un faible trémor a de nouveau été enregistré. A l'exception de quelques projections de laves résiduelles observées dans le cône le 6 octobre entre 18h30 et 19h30 heure locale, aucun signe d'activité éruptive en surface n'a été reporté au cours de cette phase de trémor.

L'éruption a émis un volume total de lave en surface d'environ 11,6 millions de $m^3$.

Le cône a été baptisé « Piton Tikal » par la Cité du Volcan, le Parc National de La Réunion et l'OVPF. Ce nom renvoie aux contes et légendes de La Réunion associés à Gran Mèr Kal (qui habiterait dans le volcan). Dans ces différentes « zistwar » il est parfois fait référence à son fils, sous le nom de Ti Kala ou Tikal.
Ce nouveau cône volcanique s'étant construit à proximité du Piton Kalla et Pélé dont le nom renvoi à Gran Mèr Kal et à la déesse Pélé à Hawaii (éruption d'août-octobre 2015), avec une forme relativement identique, c'est tout naturellement que ce nom est apparu.

**Les détails sur l'activité éruptive de 2022 sont à retrouver dans les bulletins quotidiens détaillés d'éruptions et les bulletins mensuels de l'OVPF (ISSN *2610-5101*) :**
**https ://www.ipgp.fr/observation/ovs/ovpf/**

Du côté de l'OVPF, ces 32 jours d'éruptions en 2022 et cette intrusion se sont traduits par :

▪ 516 heures d'astreintes renforcées (se rajoutant aux astreintes H24 classiques) ; 108 de ces heures ont été assurées avec le soutien d'agents IPGP depuis Paris.

▪ 44 communiqués exceptionnels détaillés d'activité (se rajoutant aux bulletins quotidiens semi-automatiques relatifs aux observations de la veille et aux bulletins mensuels). Ces bulletins sont consultables en ligne sur la page internet de l'OVPF (https ://www.ipgp.fr/observation/ovs/ovpf/).

▪ 5 VONAs (Volcano Observatory Notice for Aviation) émis auprès des VAACs (Volcanic Ash Advisory Center) de Toulouse et de Londres.

▪ 9 alertes en lien avec l'activité du volcan auprès de l'astreinte de l'Etat major de zone et de protection civile de l'océan Indien – EMZPCOI (augmentation de sismicité, crises sismiques, début trémor éruptif, fin trémor éruptif, …).
Ces différentes alertes auprès de l'EMZPCOI ont conduit à 8 changements de niveau d'alerte prévu dans le cadre du dispositif ORSEC « Volcan du Piton de la Fournaise », par le préfet de La Réunion :

| |
|---|
| **17/01/2022** – 08h00 : Passage en Sauvegarde |
| **21/01/2022** – 08h00 : Passage en Vigilance |
| **07/09/2022** – 17h00 : Passage en Alerte 1 |
| **09/09/2022** – 08h00 : Passage en Vigilance |
| **19/09/2022** – 06h45 : Passage en Alerte 1 |
| **19/09/2022** – 08h05 : Passage en Alerte 2-1 |
| **05/10/2022** – 20h00 : Passage en Sauvegarde |
| **14/10/2022** – 08h00 : Passage en Vigilance |

# 4. Sismicité

- ***Collaborations nationales principales*** : F. Beauducel (IPGP) ; O. Lengliné (EOST) ; O. Coutant (ISTerre) ; N. Shapiro (ISTerre) ; C. Journeau (ISTerre) ; F. Fontaine (LGSR/IPGP) ; L. Michon (LGSR/IPGP) ; M. Gerbault (OMP)

- ***Collaborations internationales principales*** : T. Lecoq (ROB) ; F. Massin (ETH) ; M.Pischiutta (INGV) ; Eva Eibl (U. Potsdam)

## > Le réseau sismologique de l'OVPF

Le réseau sismologique "PF" de l'observatoire volcanologique du Piton de la Fournaise est composé de 46 stations sismologiques représentant un total de 109 voies échantillonnées à 100 Hz transmises en temps réel à l'OVPF.

Ce réseau comporte 30 stations large bande à 3 composantes, 2 stations 3 composantes courte période et 13 stations analogiques à 1 composante verticale (Figure 8). La station large bande RIV5 du réseau temporaire "ZF" déployée par le Laboratoire géosciences Réunion – LGSR (Université de La Réunion) dans la rivière des Pluies a été pérennisée et est maintenant intégrée au réseau PF sous le nom de RVP. Cette station est télémétrée en temps réel à l'observatoire grâce à la mise en place d'un relais installé par les équipes techniques de l'OVPF (cf. réalisations techniques dans la section 8). Cette station vient compléter 2 stations sismologiques précédemment installées par le LGSR (MAID au Maido et LAC au collège de Salazie) qui furent intégrées au réseau PF respectivement en 2015 et en 2017. Des discussions sont actuellement en cours avec le LGSR pour la pérennisation d'autres stations sismologiques du réseau ZF sans que cela ne constitue une charge supplémentaire pour les équipes de l'OVPF. Ces stations présentent un intérêt pour le suivi de la sismicité au nord de l'île de La Réunion qui présente des essaims actifs sous le massif de la Roche Écrite et sous le cirque de Salazie.

Sur le Piton de la Fournaise, en collaboration avec Eva Eibl de l'Université de Potsdam, un sismomètre optique rotationnel BlueSeis a été installé en octobre 2021 à côté de la station Géoscope RER (située dans le tunnel EDF de la Rivière de l'Est), un second a été installé en novembre 2022 à proximité de la station CSS (cf. section 9 pour plus de détails sur ce projet). L'installation de cet instrument a été complétée par une antenne composée de 7 stations large-bande autour de CSS (Figure 9). Un nouveau site a été identifié pour remplacer la station du Flanc Est (FLR, détruite le 5 avril 2020 par une éruption qui avait débuté 3 jours plus tôt), et un nouveau site doit être trouvé pour celle de Villèle (VIL, station évacuée et site détruit lors de l'éruption d'avril 2021 sur le flanc sud du volcan). Des structures supportant le système d'acquisition, les batteries et les panneaux solaires ont été construites et testées à l'observatoire pour ces deux nouvelles stations et sont prêtes à être installées. Les stations du piton Trois Têtes (TTR) et de Takamaka (TKR) et Teophane Begue (TEO), actuellement équipées de capteurs courte période à 1 composante (Mark Product 1Hz), vont être rénovées et dotées de sismomètres large-bande (cf. section 8).

Les données (format miniSEED) sont disponibles en temps réel et via seedlink sur le serveur du centre de données de l'IPGP (rtserveur.ipgp.fr ; port TCP : 18000) et les fichiers dits "dataless", décrivant les caractéristiques des instruments permettant de corriger les signaux de la réponse instrumentale, sont régulièrement revus, mis à jour ou corrigés et sont disponibles sur le portail Volobsis de l'IPGP (http://volobsis.ipgp.fr). Les localisations hypocentrales sont disponibles après validation par un sismologue via le BCSF-RENASS (http://renass.unistra.fr/fr/zones/la-reunion) et via le webservice de l'IPGP.

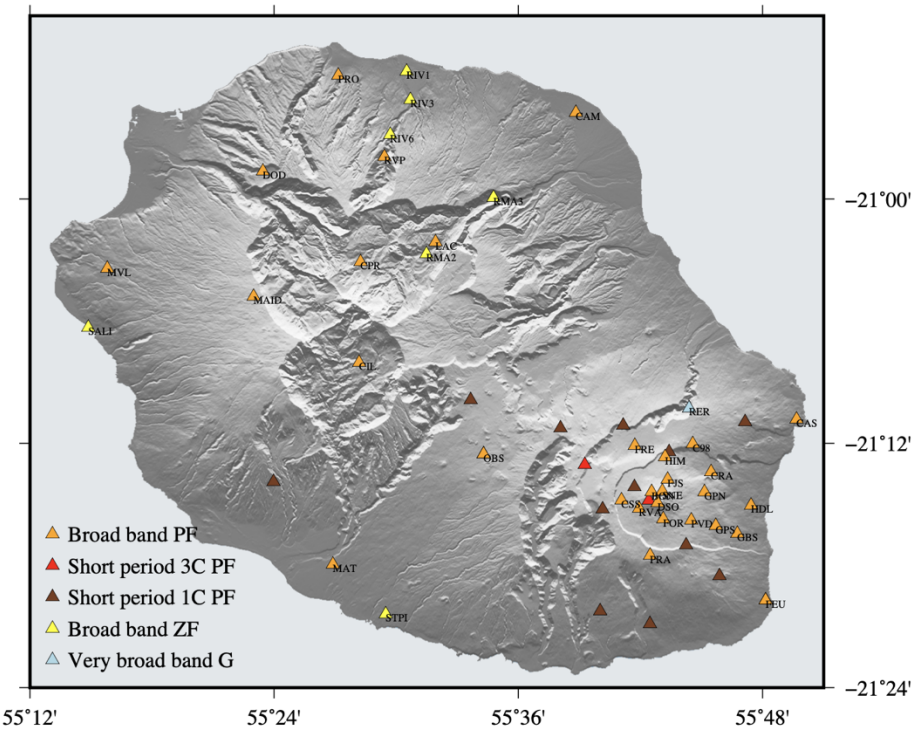


*Figure 8 : Carte des réseaux sismologiques de La Réunion au 31 décembre 2022. Chaque triangle représente une station sismique équipée d'un sismomètre large bande (LB), d'un capteur courte période (1Hz) à 3 composantes (CP-3C), ou vertical (CP-3C). En complément des stations du réseau de l'OVPF (PF), est également présenté le réseau temporaire de la rivière des pluies (ZF) installé par le LGSR (Université de La Réunion) et utilisé pour le suivi de la sismicité au nord de l'île.*

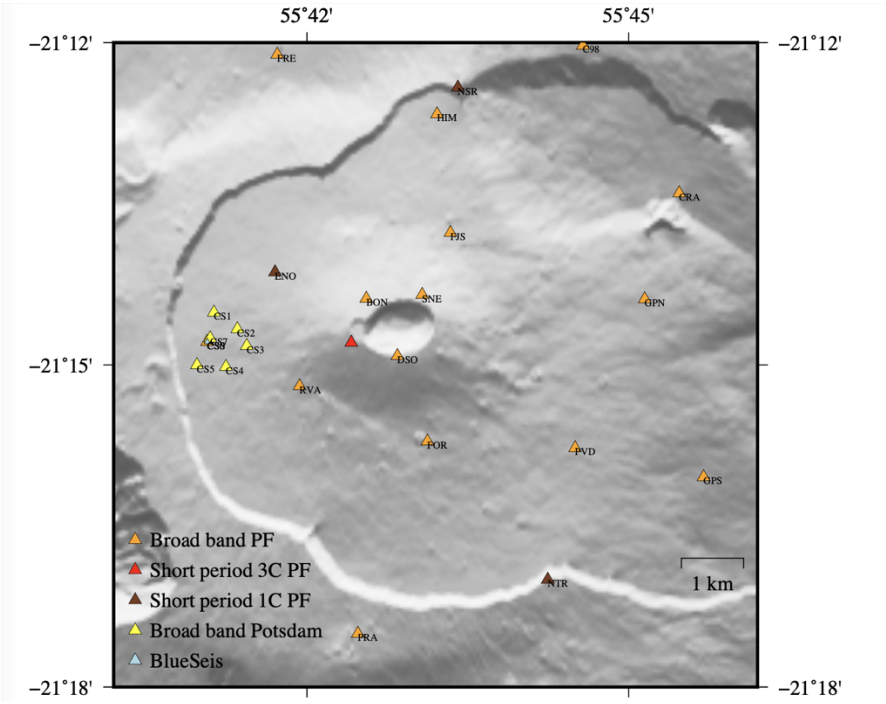


*Figure 9 : Zoom sur le réseau sismologique au Piton de la Fournaise fin 2022. Le réseau temporaire des stations CS0-CS7 installées en collaboration avec l'université de Potsdam est également présenté.*

## > Activité sismique en 2022

L'OVPF effectue le suivi en continu de l'activité sismique se produisant au niveau du Piton de la Fournaise et plus largement à l'échelle de l'île de La Réunion. Le réseau sismologique de l'OVPF enregistre également l'activité sismique se produisant à l'échelle régionale (autour des Mascareignes) et à l'échelle mondiale (correspondant généralement à des téléséismes de fortes magnitudes).
En plus des séismes, l'observatoire enregistre d'autres types de signaux comme des éboulements rocheux, des ondes sonores liées aux orages, du bruit lié à l'activité anthropique (ex. hélicoptères) ou à l'interaction entre l'océan et la terre solide (bruit microsismique).

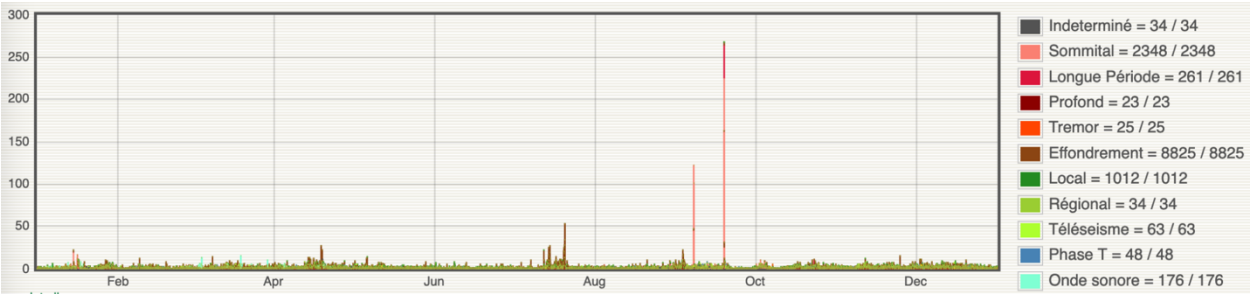

*Figure 10 : Nombre d'évènements par jour enregistrés dans la main courante de l'OVPF (pointage manuel) en 2022.*

Le dépouillement des données sismologiques a permis de détecter (cf., Figure 10) :

- 2348 séismes volcano-tectoniques sommitaux (au-dessus du niveau de la mer, sous le sommet du Piton de la Fournaise)
- 261 séismes Longue Période (LP) ou très longue période (VLP) au niveau du Piton de la Fournaise
- 23 séismes volcano-tectoniques profonds (sous le niveau de la mer au Piton de la Fournaise)
- 1012 séismes locaux (sous l'île de La Réunion et à moins de 200 km des côtes)
- 34 séismes régionaux (à des distances comprises entre 200 et 3000 km de l'île)
- 63 téléséismes (à plus de 3000 km de l'île)
- 8825 éboulements
- 176 ondes sonores (majoritairement associées à des orages)

**Sismicité régionale**

La majorité de l'activité sismique régionale est associée à la sismicité de la dorsale sud-ouest indienne et de la dorsale centrale indienne.
En 2022, aucun séisme associé à l'activité sismo-volcanique de Mayotte n'a été enregistré sur les stations sismologiques installées à La Réunion.

**Sismicité locale**

A l'échelle de l'île de La Réunion, plusieurs zones d'activité sismique sont identifiées. Sur la Figure 12, on distingue d'abord une activité sismique tout au nord de l'île sous le massif de la Roche Écrite. Cette activité, persistante depuis plusieurs années, est localisée dans la croûte océanique sous l'édifice volcanique du Piton des Neiges. Depuis fin 2022, on identifie une nouvelle zone d'activité sismique plus au sud-est au niveau du cirque de Salazie. Ces évènements semblent localisés légèrement plus en profondeur par rapport à l'activité sous la Roche Écrite. La localisation de ces séismes est cependant moins bien contrainte par le réseau de l'OVPF qui dispose d'un faible nombre de stations sismiques dans cette région de l'île (Figure 8). Plus au sud, on enregistre une activité relativement diffuse au niveau de la région des Plaines avec notamment un petit essaim de sismicité au niveau de Grand Étang entre fin avril et début mai 2022. Ces séismes sont enregistrés tout au long de l'année, avec de 0 à 6 séismes par jour détectables sur les enregistrements (cf., Figure 11). Sur la Figure 12, on distingue également l'activité sismique associée à l'activité du Piton de la Fournaise (discutée ci-dessous).

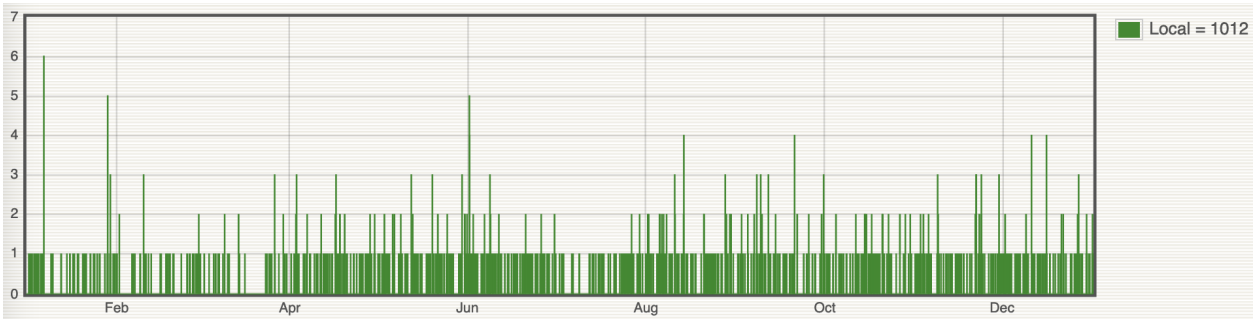


*Figure 11 : Nombre de séismes locaux (à l'échelle de l'île de La Réunion) enregistrés par jour en 2022, correspondant aux évènements situés à moins de 200 km des côtes réunionnaises. Les séismes volcano-tectoniques associés à l'activité du Piton de la Fournaise sont présentés sur les Figures 10, 14 et 15 en tant que séismes sommitaux ou profonds.*

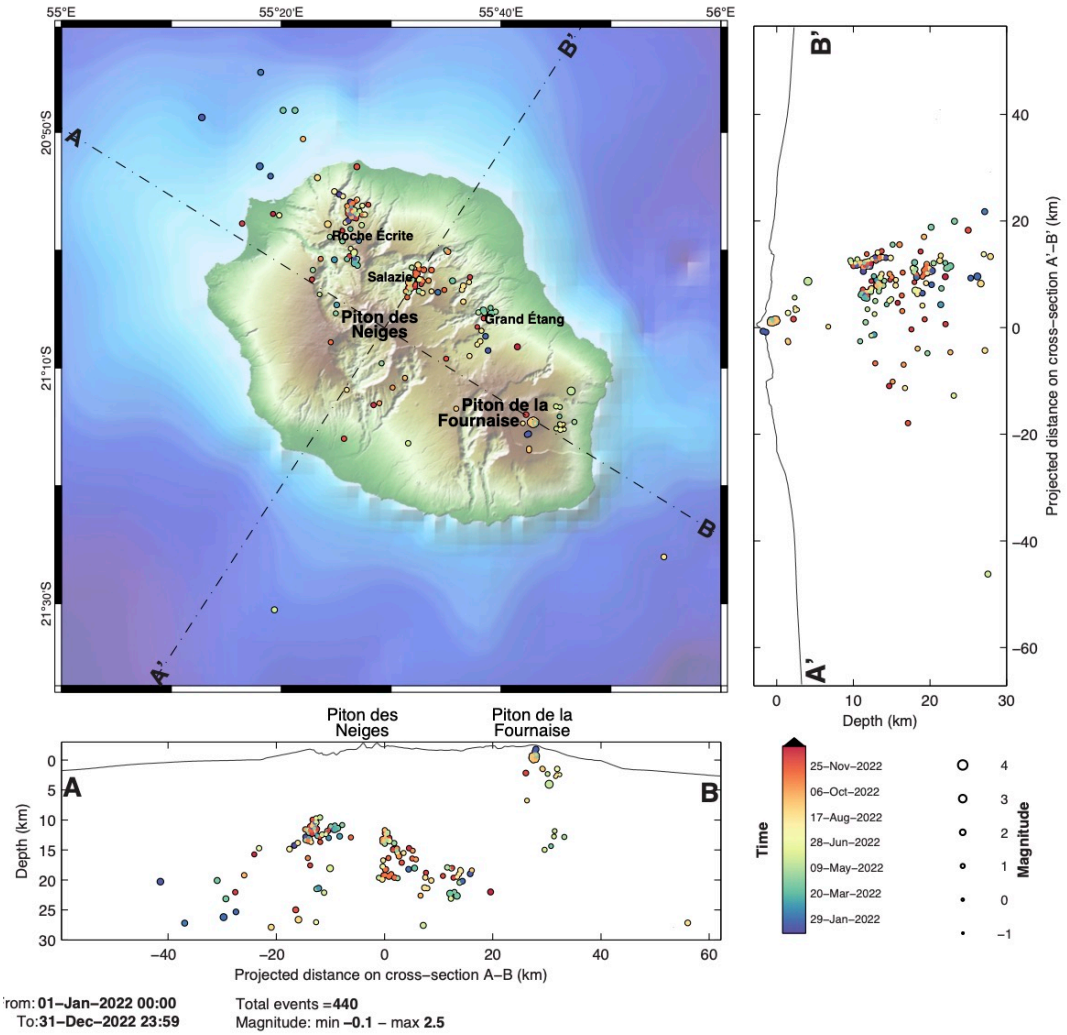


*Figure 12 : Localisation des séismes au cours de l'année 2022. Chaque séisme est représenté par un cercle dont le diamètre dépend de la magnitude et dont la couleur indique la date du séisme. Le modèle de vitesse utilisé pour la localisation est un gradient de vitesse suivant la topographie. Seuls les séismes localisés manuellement sont présentés sur cette figure (représentant environ 13% de l'ensemble des événements détectés au niveau de La Réunion).*

**Sismicité du Piton de la Fournaise**

Différents types de signaux sismiques sont enregistrés au niveau du volcan du Piton de la Fournaise. La grande majorité des séismes correspondent à des événements volcano-tectoniques (VT) sommitaux, localisés dans l'édifice volcanique au-dessus du niveau de la mer et sous les cratères sommitaux (Figure 13). Ces séismes sont principalement distribués sur une faille annulaire héritée des effondrements de cratères sommitaux comme celui d'avril 2007. Cette structure annulaire est systématiquement activée au début des injections magmatiques depuis le réservoir superficiel sous la forme de crises sismiques.

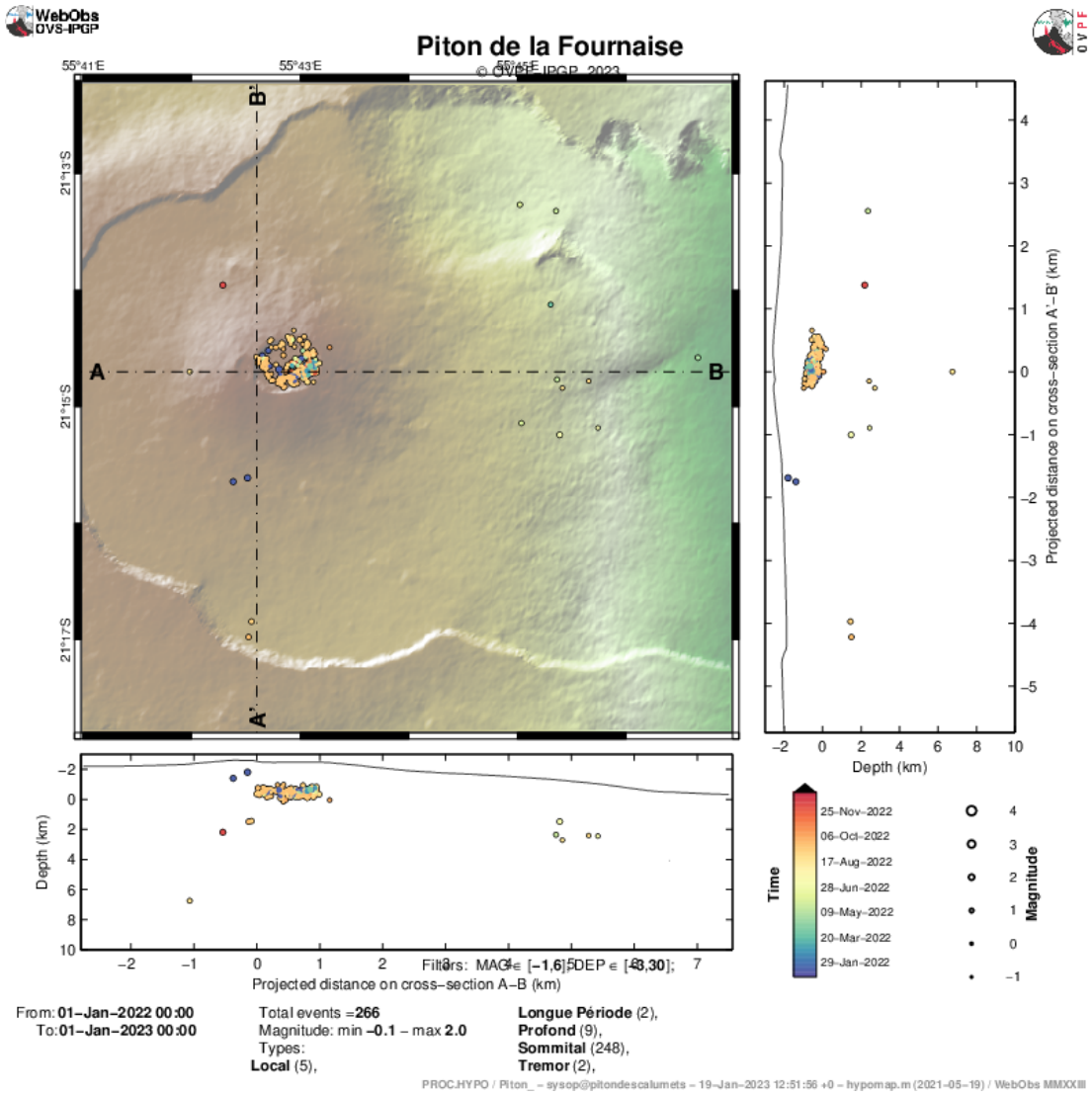


*Figure 13 : Localisation des séismes à l'échelle de la caldera de l'Enclos Fouqué en 2022. Chaque séisme est représenté par un cercle dont le diamètre dépend de la magnitude et dont la couleur indique la date du séisme. Cette carte ne présente que les séismes détectés et localisés manuellement par l'OVPF (représentant environ 11% des séismes détectés au niveau de l'Enclos Fouqué).*

En 2022, deux crises sismiques se sont produites lors d'une intrusion avortée le 7 septembre et avant l'éruption du 19 septembre (Figure 14). Ces crises sismiques pré-éruptives se manifestent généralement sous la forme d'une migration de sismicité sur une partie de la faille annulaire, fournissant ainsi une indication sur la localisation du futur site éruptif par rapport au cône terminal (Duputel et al., 2019). La Figure 16 montre la relocalisation par double-différence des évènements lors de la crise sismique pré-éruptive du 19 septembre 2022. On voit que les séismes sont localisés sur la bordure sud-ouest du cratère Dolomieu dans la direction du site éruptif.

Sur les Figures 13 et 15, on distingue également quelques VT profonds sous le réservoir et sous le flanc-est du volcan. Le nombre d'évènements profonds reste assez faible par rapport à 2021 qui fut marquée par une crise sismique associée à une intrusion sous le flanc-est le 18-19 octobre 2021.

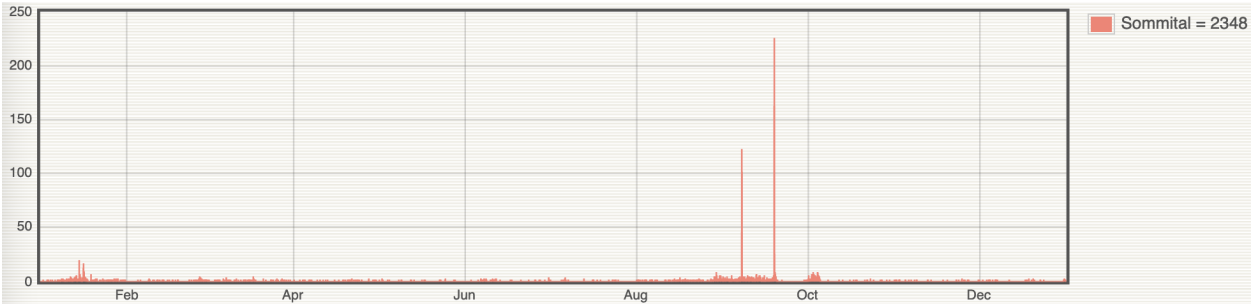


*Figure 14 : Nombre de séismes volcano-tectoniques sommitaux enregistrés par jour en 2022. Ces séismes sont localisés au-dessus du niveau de la mer sous le sommet du Piton de la Fournaise (Figure 13).*

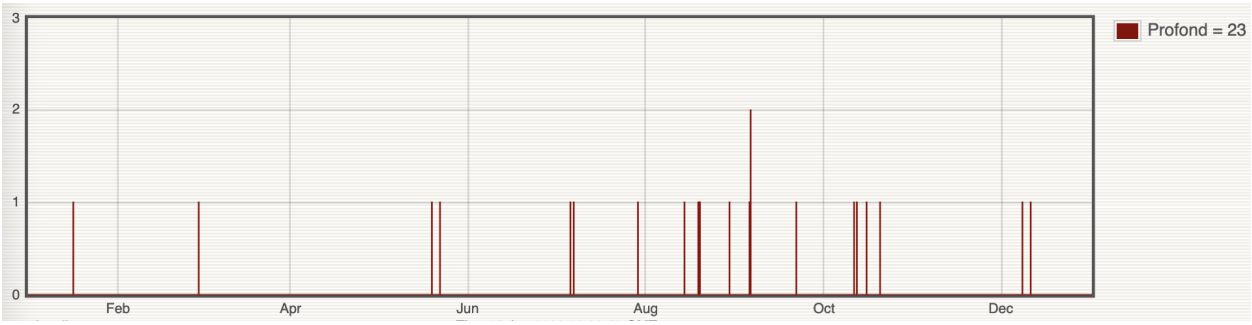


*Figure 15 : Nombre de séismes volcano-tectoniques profonds enregistrés par jour en 2022. Ces séismes sont localisés sous le niveau de la mer au Piton de la Fournaise (Figure 13).*

Enfin, de nombreux séismes longue période (LP) ou très longue période (VLP pour "Very Long Period") ont été détectés. En particulier, un essaim de signaux VLP a été enregistré lors de la crise pré-éruptive du 19 septembre 2022 (Figures 17 et 18). Cet épisode est marqué par une occurrence quasi-périodique d'évènements VLP débutant au moment du signal "Jerk" (cf. section suivante) à la station RER (Figure 19). Des signaux similaires ont été détectés lors d'autres éruptions au Piton de la Fournaise et sur d'autres volcans. Ils sont généralement interprétés comme la résonance de fractures remplies de fluides (magma ou fluides hydrothermaux). Le changement de période visible sur le spectrogramme de la Figure 18 peut être interprété comme une augmentation de la taille de la fracture en résonance, pouvant correspondre à un allongement du dike magmatique se propageant vers la surface. Cette séquence de signaux VLP est actuellement en cours d'analyse et fera l'objet d'un stage de recherche de Master 2 entre février et juin 2023.

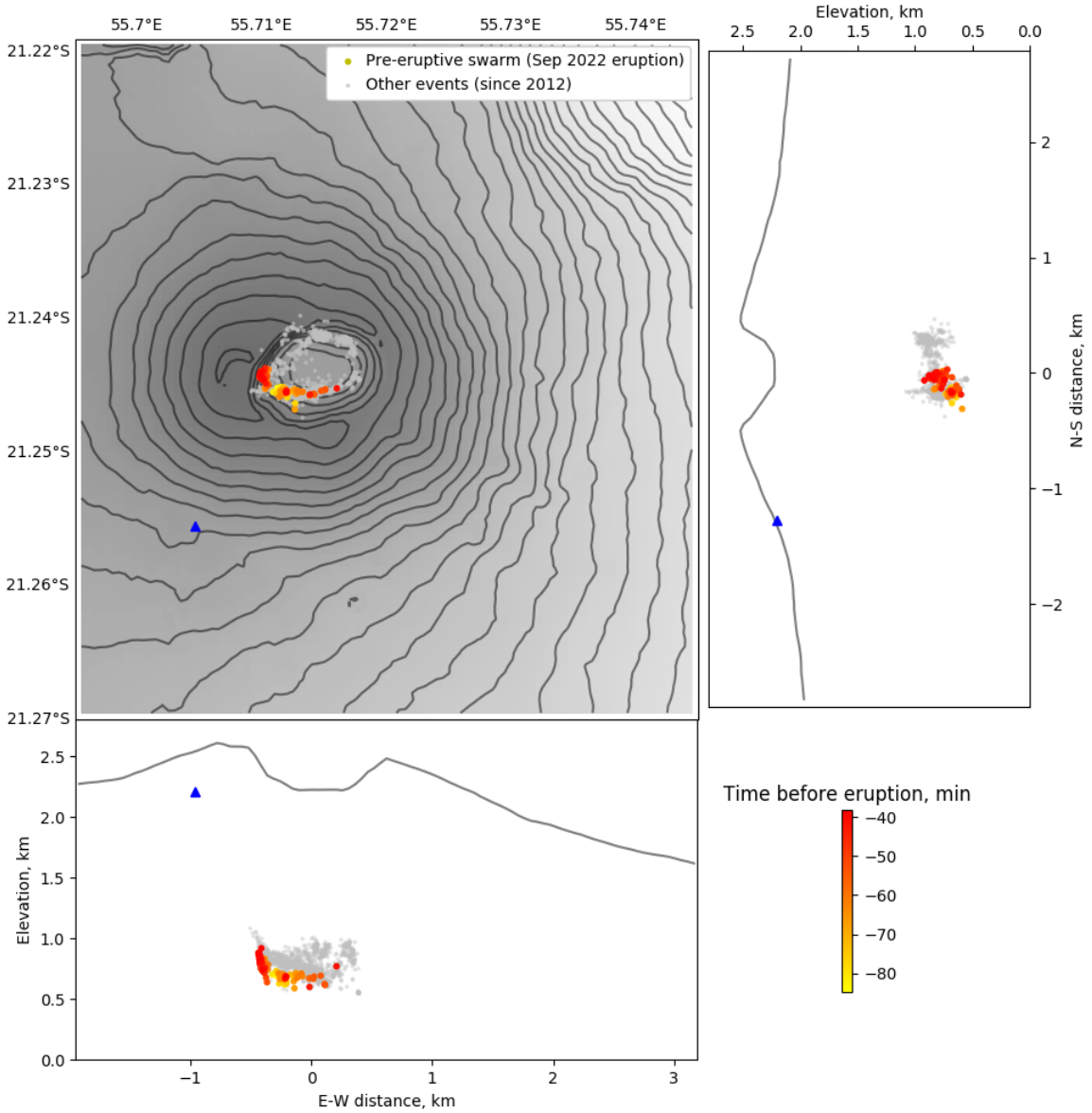


*Figure 16 : Relocalisation automatique des séismes détectés par "template matching" lors de la crise sismique pré-éruptive du 19 septembre 2022. Les points gris représentent l'ensemble des séismes relocalisés depuis 2012. Les points en couleurs sont les évènements de la crise pré-éruptive du 19 septembre avec un code de couleur indiquant le temps en minute avant le début de l'éruption (défini à partir de l'apparition du trémor volcanique dans les enregistrements). La localisation du site éruptif est indiquée par le triangle bleu.*

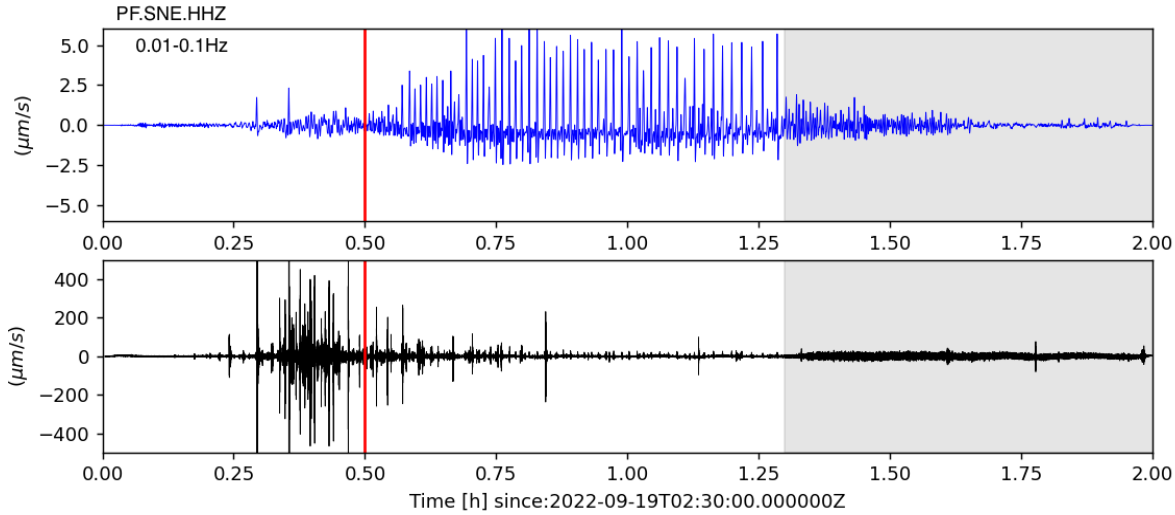


*Figure 17 : Essaim de séismes VLP lors de la crise sismique pré-éruptive du 19 septembre 2022. Le sismogramme en haut correspond à l'enregistrement vertical de SNE (au sommet du volcan) déconvolué en vitesse et filtré entre 0,01 et 0,1 Hz. Le sismogramme du bas présente les données en vitesse avant filtrage à la même station. Chaque pic visible sur le sismogramme du haut correspond à un séisme VLP. La barre rouge représente le début du signal Jerk et la partie grisée correspond au début de l'éruption.*

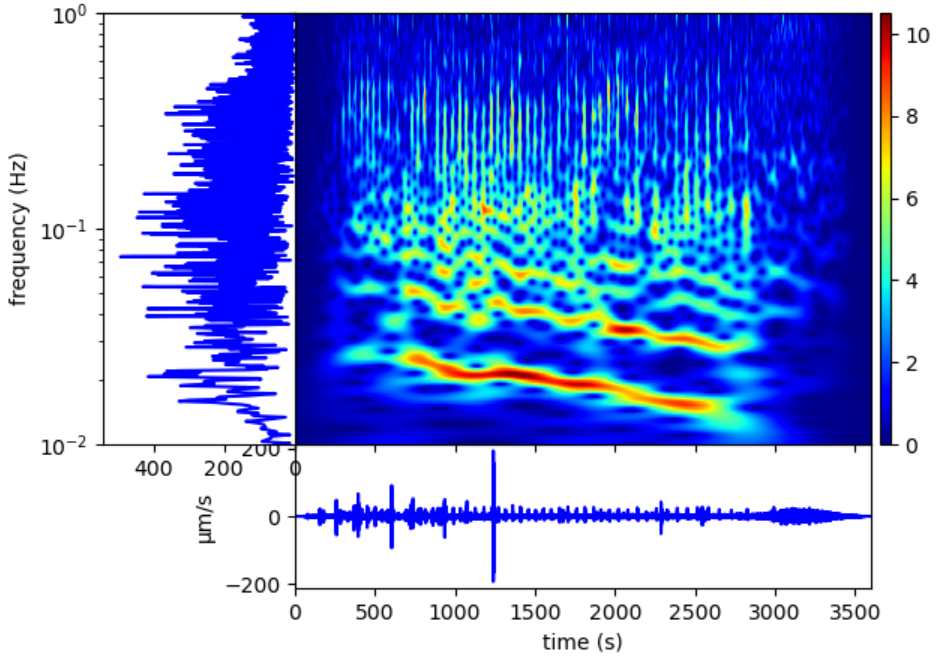


*Figure 18 : Spectrogramme présentant l'essaim VLP lors de la crise sismique pré-éruptive du 19 septembre 2022. Le spectrogramme est visible en haut à droite, la sous-figure du bas présente les données en vitesse filtrées entre 0,01 et 1,0 Hz et la sous-figure de gauche est le spectre correspondant. On distingue plusieurs harmoniques avec des fréquences propres diminuant en fonction du temps.*

**Surveillance “Jerk”**

Le « Jerk » est un système d’alerte basé sur l’accélération des signaux de la station sismologique RER (localisée dans le tunnel EDF de la Rivière de l’Est). Il détecte les signaux transitoires basse fréquence dans les mouvements horizontaux du sol associés à la propagation des dikes peu profonds.
La Figure 19 montre le signal « Jerk » associé à l’éruption du 19 septembre qui a bien identifié l’injection du dike associée à cette éruption.

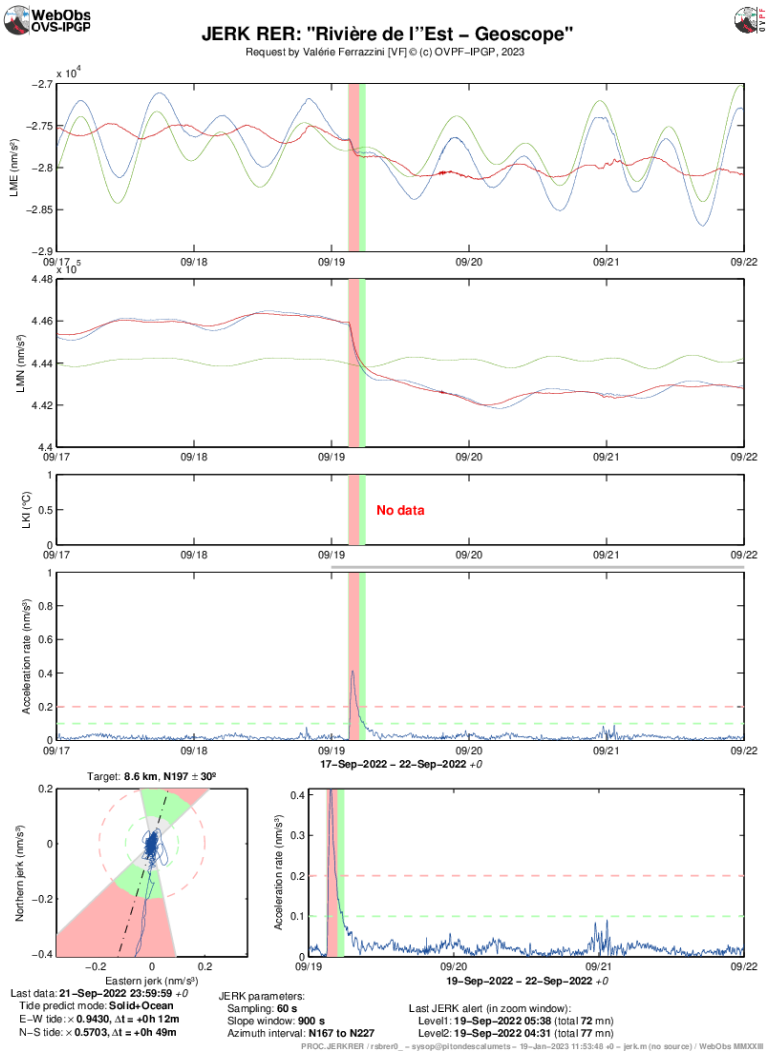


*Figure 19 : Page WebObs du « Jerk » lors du 19 septembre 2022.*

**Suivi du trémor éruptif**

Au cours des éruptions au Piton de la Fournaise, le suivi de l’activité en surface repose notamment sur l’observation du trémor volcanique qui est généré par le dégazage du magma au niveau de l’évent éruptif. L’enregistrement de ce trémor par différentes stations sismologiques permet ainsi une détermination rapide de la localisation du site éruptif (cf. Figure 20 pour l’éruption du 19 septembre – 5 octobre 2022).

L'évolution temporelle du trémor, estimé par mesures RSAM (Real-time Seismic-Amplitude Measurement), est un bon indicateur des variations de l'activité en surface. Les fluctuations de l'amplitude du trémor visibles sur la Figure 20 sont liées à différents facteurs comme la variation du flux de lave émis, la construction du cône éruptif et la modification de sa géométrie au cours du temps.

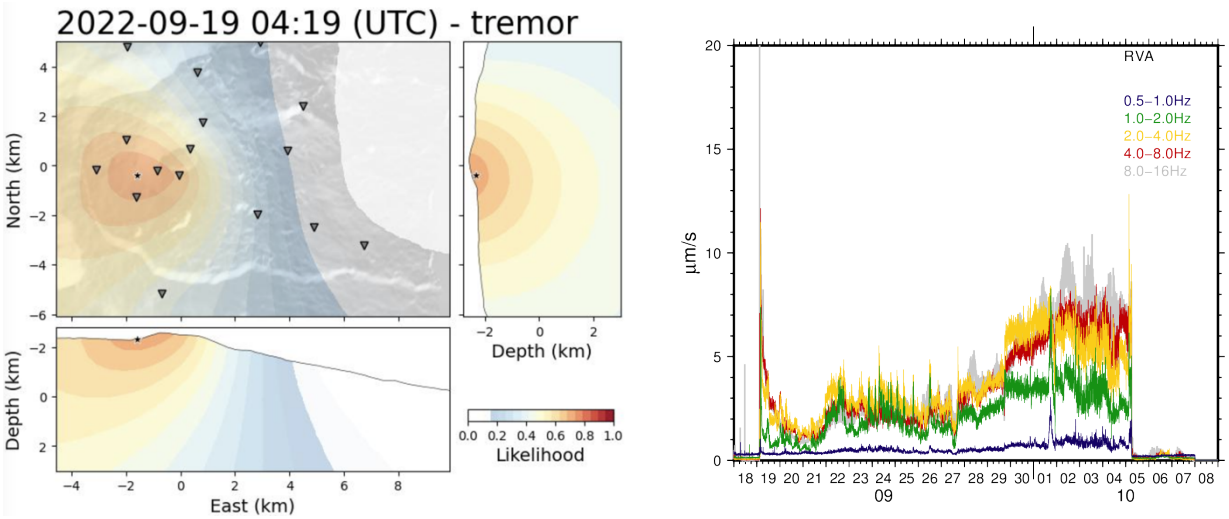


*Figure 20 : Suivi du trémor volcanique lors de l'éruption du 19 septembre-5 octobre 2022. La sous-figure à gauche présente la localisation du trémor par Covseisnet (implémenté à l'OVPF par C. Journeau). La sous-figure à droite montre l'évolution temporelle de l'amplitude du trémor volcanique au cours de l'éruption.*

***Références :***

*Duputel, Z., O. Lengliné, V. Ferrazzini (2019), Constraining spatiotemporal characteristics of magma migration at Piton de la Fournaise volcano from pre-eruptive seismicity, Geophysical Research Letters, 46(1), 119-127*

*Observatoire Volcanologique Du Piton De La Fournaise (OVPF), Institut De Physique Du Globe De Paris (IPGP), Seismic, tiltmeter, extensometer, magnetic and weather permanent networks on Piton de la Fournaise volcano and La Réunion. Dataset (2008), doi:10.18715/REUNION.PF*

# 5. Géodésie

- ***Collaborations nationales principales*** : F. Beauducel (IPGP) ; O. Bousquet (LACy/Univ. Réunion/Météo France) ; J. Van Baelen (LACy/Univ. Réunion) ; JL.Froger (LMV/OPGC) ; V. Cayol (LMV/OPGC) ; JL. Froger (Univ. Saint-Etienne, ISDeform) ; JL. Got (ISTerre) ; M. Gerbault (IRD Toulouse)

- ***Collaborations internationales principales*** : M. Poland (USGS) ; A. Bonforte (INGV) ; B. Taisne (EOS) ; F. Sigmundsson (University of Iceland)

## > Les réseau de surveillance de la déformation de l'OVPF

En 2022, le réseau permanent de surveillance de la déformation du Piton de la Fournaise comprenait :

- 26 stations GNSS (Global Navigation Satellite System)
- 10 couples d'inclinomètres sur 9 sites différents
- 3 extensomètres 3 composantes

### Le réseau GNSS

En 2022, le réseau GNSS (Global Navigation Satellite System) permanent de l'OVPF comprenait un total de 26 stations permanentes : 25 sur le massif du Piton de la Fournaise [dont 9 sur le cône terminal, 7 sur le flanc est dans les Grandes Pentes et le Grand Brûlé, 9 sur le pourtour extérieur de l'Enclos Fouqué ; Figures 21 et 22] et 1 au Maïdo, qui est une station OVPF / laboratoire du LACy de l'université de La Réunion.

L'OVPF utilise également les données de (i) la station de l'IGN, REUN (située à l'observatoire), (ii) de 8 stations RGP (Réseau GNSS Permanent de l'IGN), auxquelles l'OVPF a accès gratuitement via le site du RGP (depuis le 17/04/2018), (iii) ainsi que des 8 stations du réseau Lél@ (réseau de topographes de La Réunion) que l'OVPF achète et dont 2 des stations sont également incluses dans le réseau RGP (Figure 21).

L'ensemble de ces stations couvre ainsi la totalité de l'île de La Réunion.

En 2022, le rapatriement des données horaires jusqu'à l'observatoire concernait 11 des stations de l'OVPF. La récupération des données provenant des autres stations est toujours effectuée 1 fois par jour. Le rapatriement horaire permet de désengorger les flux et de traiter plus rapidement et fréquemment les données, ceci étant de première importance en cas de gestion de crise.
A l'avenir, nous souhaitons que toutes les stations puissent être rapatriées toutes les heures, voire même à une fréquence supérieure. Des tests sont toujours en cours sur ce sujet.

Une fois les données rapatriées, celles-ci sont automatiquement traitées par deux logiciels (GAMIT, GIPSYX - en remplacement de GIPSY depuis mi-2019). Les chaines de calculs GAMIT et GIPSYX, complémentaires (rapidité de GIPSYX et meilleure précision de GAMIT), tournent en parallèle. Les données sont ainsi traitées de manière horaire, quotidienne et également recalculées au bout de 24 jours afin de prendre en considération les orbites recalculées définitives mises à disposition dans ce délai de temps et d'affiner encore un peu plus la précision des calculs (Tableau 5).

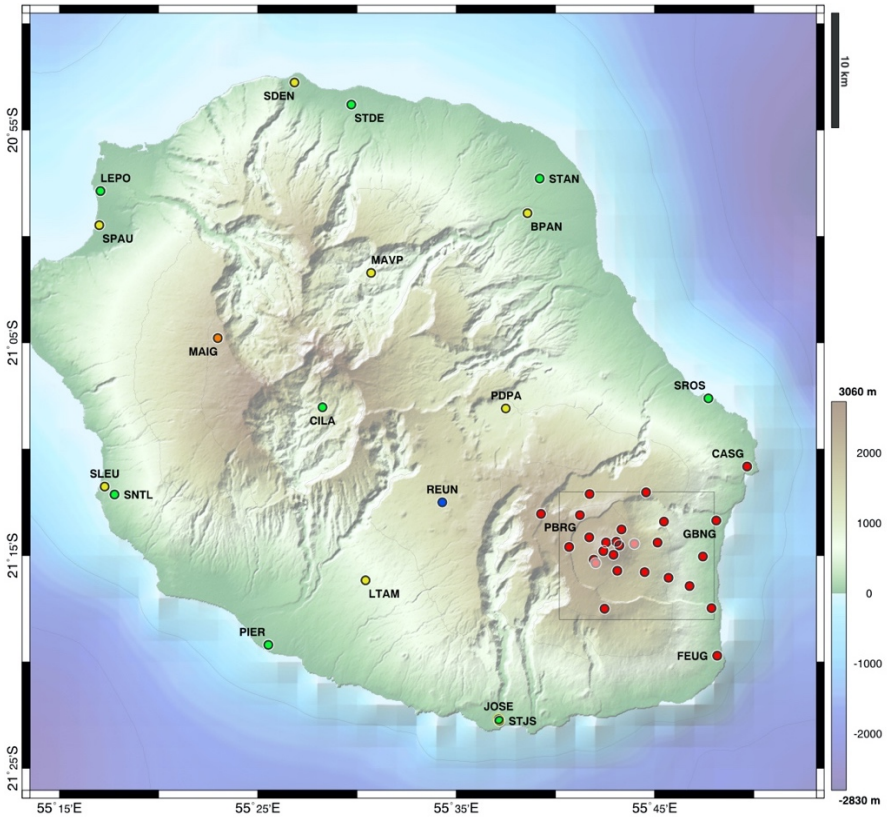


*Figure 21 : Localisation des stations GNSS de l'OVPF et de ses partenaires sur l'île de La Réunion dont les positions sont calculées à l'OVPF. En rouge : les stations de l'OVPF, en orange : la station MAIG de l'OVPF/LACy, en jaune : les stations LEL@, en vert : les stations RGP, en bleu : la station REUN de l'IGN.*

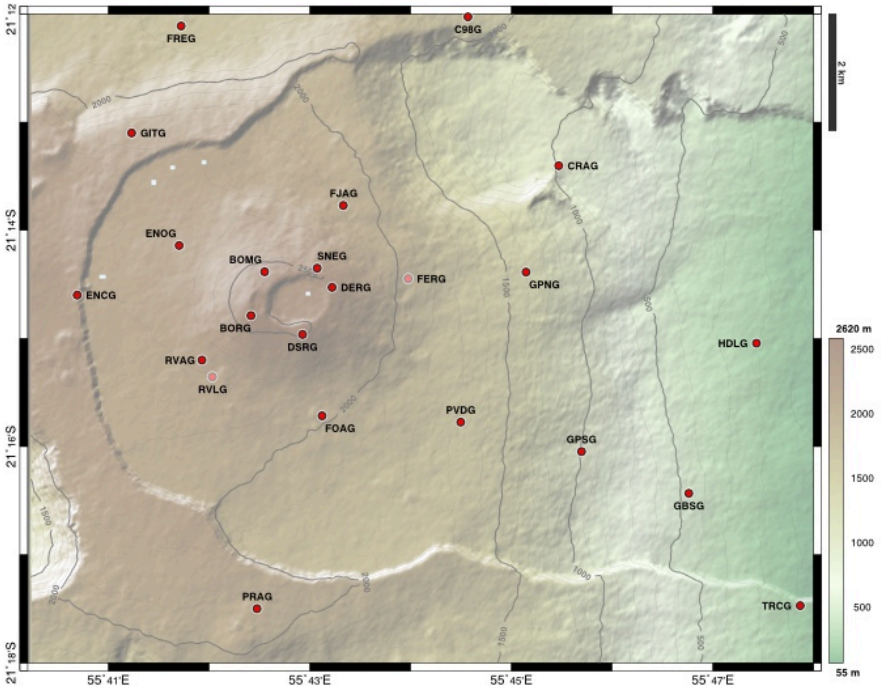


*Figure 22 : Zoom sur la localisation des stations GNSS de l'OVPF dans et autour de l'Enclos Fouqué.*

| | 1h | 24h | | 24 jours | |
|---|---|---|---|---|---|
| | GIPSY/TRACK | GAMIT | GIPSYX | GAMIT | GIPSYX |
| **Résultats** | Différentiel | Position | Position | Position | Position |
| **Solution** | Pour chaque époque de mesure (1pt/sec ou 1 pt/90 sec) | Journalière (1pt/jour) | Journalière (1pt/jour) | Journalière (1pt/jour) | Journalière (1pt/jour) |
| **Précision (cm)** | Horizontal (H) : 5<br>Vertical (V) : 10 | H : 0.5<br>V : 2-2.5 | H : 0.5-0.7<br>V : 2-3 | H : 0.2<br>V : 1.5 | H : 0.2-0.5<br>V : 1.5-2 |
| **Intégration Éphémérides GPS** | Ultra Rapides | Ultra Rapides / Rapides | Ultra Rapides / Rapides | Finales | Finales |
| **Corrections troposphère/marées/…** | - | Oui | Oui | Oui | Oui |
| **Stabilisation du réseau** | - | Oui | - | Oui | - |
| **Durée de calcul** | qq mins | 1-3 h | qq secs / mins / stations | 1-3 h | qq secs / mins / stations |
| **Mise à disposition des données** | + 1 h | + 1 jour et qq heures | + 1 jour et qq minutes | + 24 jours | + 24 jours |

*Tableau 5 : Tableau synthétisant l'ensemble des traitements GNSS automatiques installés à l'OVPF en routine.*

A ce réseau permanent, se rajoute un réseau de 70 tiges, installé sur le cône terminal du Piton de la Fournaise et à sa base afin de densifier les mesures GNSS. En effet après chaque éruption, des campagnes de mesure sur le terrain sont organisées pour réitérer ce réseau, permettant ainsi de mieux contraindre spatialement la distribution des déformations de surface et de mieux contraindre la localisation et le cheminement du magma vers la surface lors de l'injection du dike.

### Le réseau inclinométrique et extensométrique

Le réseau inclinométrique et extensométrique de l'OVPF se composait en 2022 de (Figure 23) :

- 5 couples d'inclinomètres de type BLUM (4 à l'intérieur de la caldera de l'Enclos Fouqué et 1 à l'extérieur, à 8 km du sommet dans le tunnel de Rivière de l'Est) et 2 couples d'inclinomètres Spectron (installés en surface), le tout installé sur 6 sites différents. A noter que les inclinomètres de la station FORI (à proximité du cratère Château Fort) sur le flanc sud et l'inclinomètre tangentiel de la station DSOI (Dolomieu sud) sont actuellement hors service (cellules oxydées).

- 3 inclinomètres de forage LILY – 2 composantes (installés en bordure de la caldera de l'Enclos Fouqué),

- 3 extensomètres (3 composantes : ouverture, cisaillement, soulèvement), installés sur des fractures préexistantes.

Les données de ces stations sont transmises en temps réel vers l'observatoire.

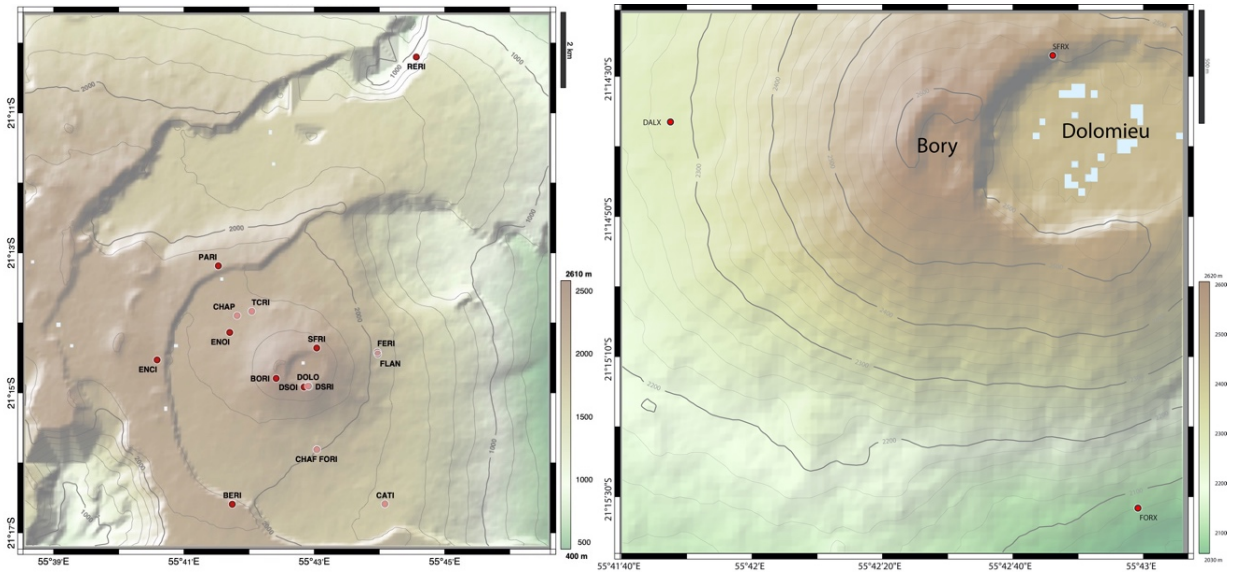


*Figure 23 : Localisation des stations du réseau inclinométrique (à gauche) et extensométrique (à droite) de l'OVPF.*

## > Observation des déformations en 2022

Comme la majorité des éruptions au Piton de la Fournaise, l'éruption du 19 septembre – 5 octobre 2022 a été précédée à la fois par des déformations à long terme et à court terme, témoins de processus distincts en profondeur - à savoir la pressurisation du réservoir magmatique (déformations lentes à long terme) et la propagation finale du magma vers la surface (déformations rapides à court terme).

*A noter que le descriptif des déformations précédant l'éruption du 22 décembre 2021 – 17 janvier 2022 est à retrouver dans le rapport d'activité 2021 de l'OVPF.*

### Déformation à long terme liée à la pressurisation du système d'alimentation

L'année 2022 fut marquée par des déformations inter-éruptives à long terme de l'édifice quasi continues du 17 janvier au 19 septembre 2022, témoins d'une inflation de l'édifice. Au cours de cette période, des accélérations se sont produites entre mi-avril et mi-mai et entre fin août et le 19 septembre, alors qu'un arrêt de l'inflation a été observé entre mi-mai et début juin (Figure 24). De même suite à l'éruption du 19 septembre – 5 octobre 2022 une inflation de l'édifice fut observée jusqu'au 23 octobre 2022. Ces déformations lentes et faibles (jusqu'à 1 mm/jour max. d'élongation au sommet et à la base du cône et jusqu'à 0,1 mm/jour d'élongation en champ lointain, à l'extérieur de l'Enclos Fouqué) ont cumulé environ 8 cm d'élongation à la base du cône (Figure 24). Ces déformations, montrant une inflation de l'édifice, traduisent une pressurisation du réservoir magmatique superficiel (localisé aux alentours de 1-2 km sous la surface) lors de sa réalimentation par du magma profond (Figure 25 ; Peltier et al., 2009 ; Beauducel et al., 2020).

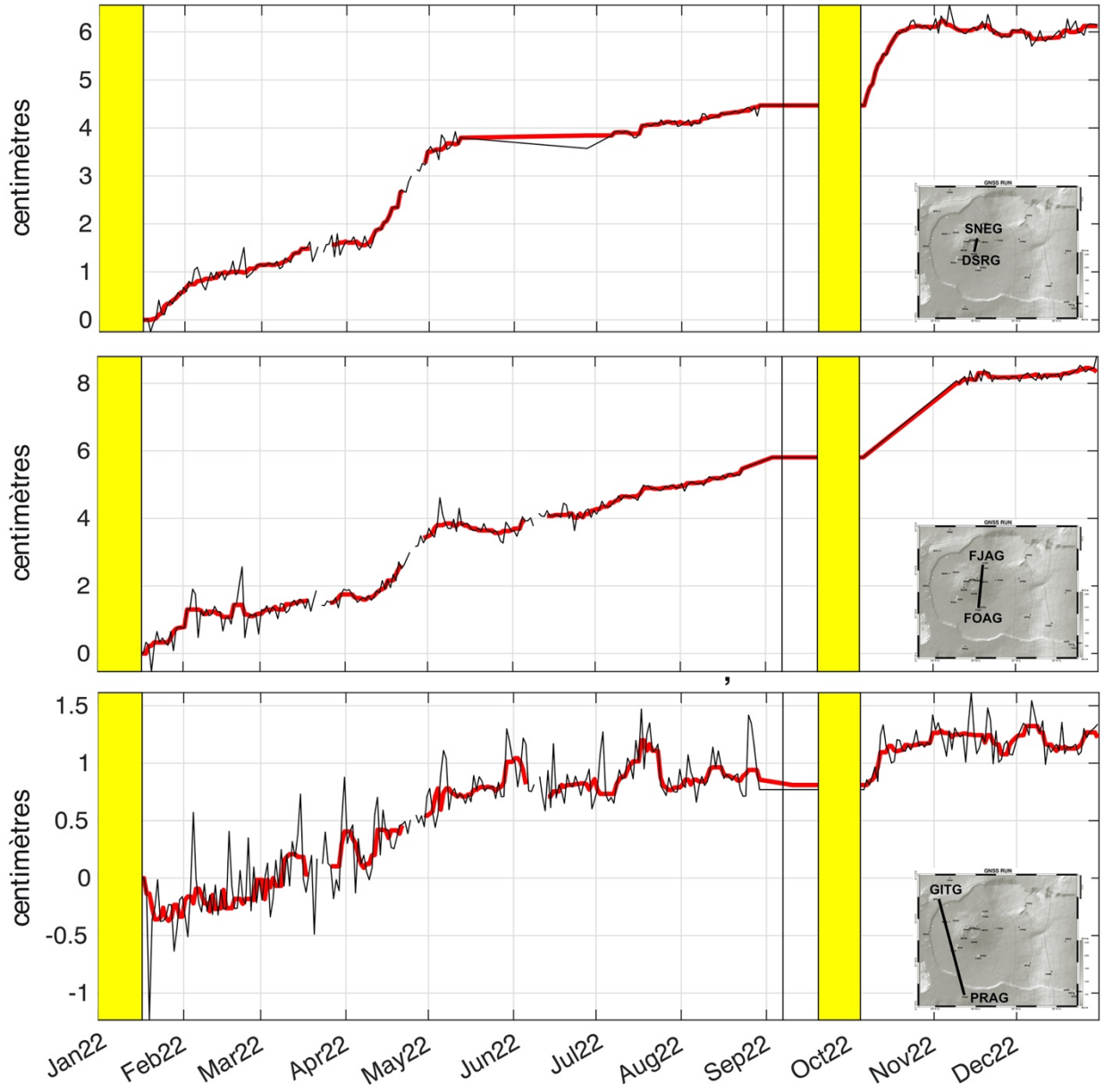


*Figure 24 : Variation de la distance entre deux stations GNSS (lignes de base en cm) du sommet (en haut), de la base du cône (au milieu) et de l'extérieur de l'Enclos Fouqué (en bas) en 2022 (cf. localisation des lignes de base dans les encarts). Les courbes noires et rouges représentent respectivement les données brutes et les données lissées sur une fenêtre glissante de 10 jours. Les périodes jaunes correspondent aux périodes éruptives et les barres noires aux intrusions. A noter que sur ces courbes les variations rapides liées à l'injection rapide du magma vers la surface précédant de quelques minutes ou de quelques heures les éruptions ont été supprimées afin de mieux faire ressortir les tendances à long terme.*

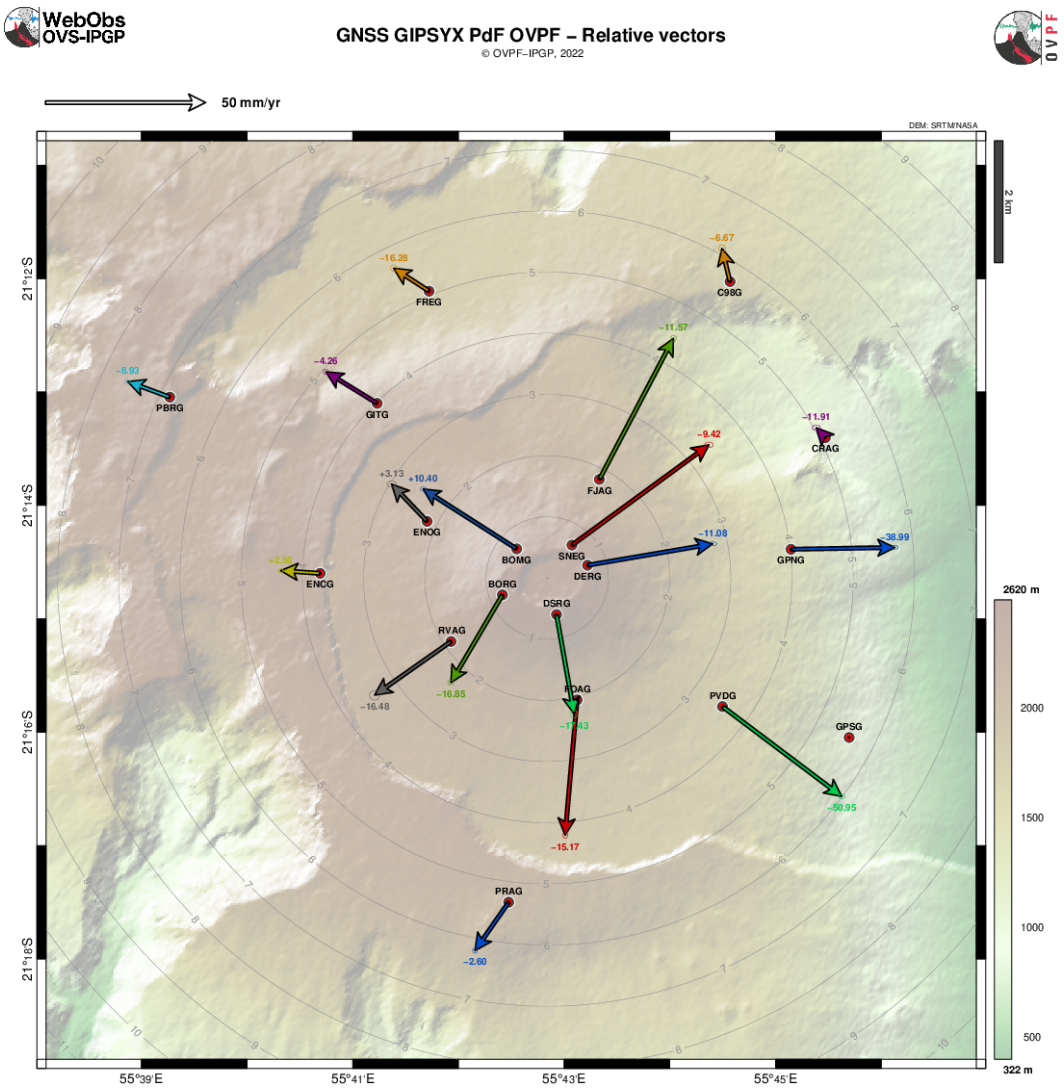


*Figure 25 : Déplacements du sol (exprimés en vitesse) enregistrés sur les stations GNSS à l'intérieur et sur le pourtour de l'Enclos Fouqué entre le 17 janvier et le 6 septembre 2022. Les déplacements horizontaux sont représentés sous forme vectorielle et les déplacements verticaux sont indiqués par les valeurs chiffrées en couleur. Les ellipses représentent les erreurs de la mesure. Sur cette figure, les données sont corrigées du mouvement de la plaque.*

Sur le flanc est, suite à l'intrusion du 28-30 septembre 2020 (arrêt de l'intrusion dans le secteur haut des Grandes Pentes), une accélération de la subsidence avait été enregistrée sur la station GPNG localisée dans la partie haute et nord des Grandes Pentes à 1414 m d'altitude (Figure 26). Très vite en 2021 le taux de subsidence est revenu au taux observé avant l'intrusion. En 2022, le taux de subsidence de cette station a ralenti, passant de 9,6 cm / an à 2021 à 3,3 cm / an en 2022 (Figure 26).

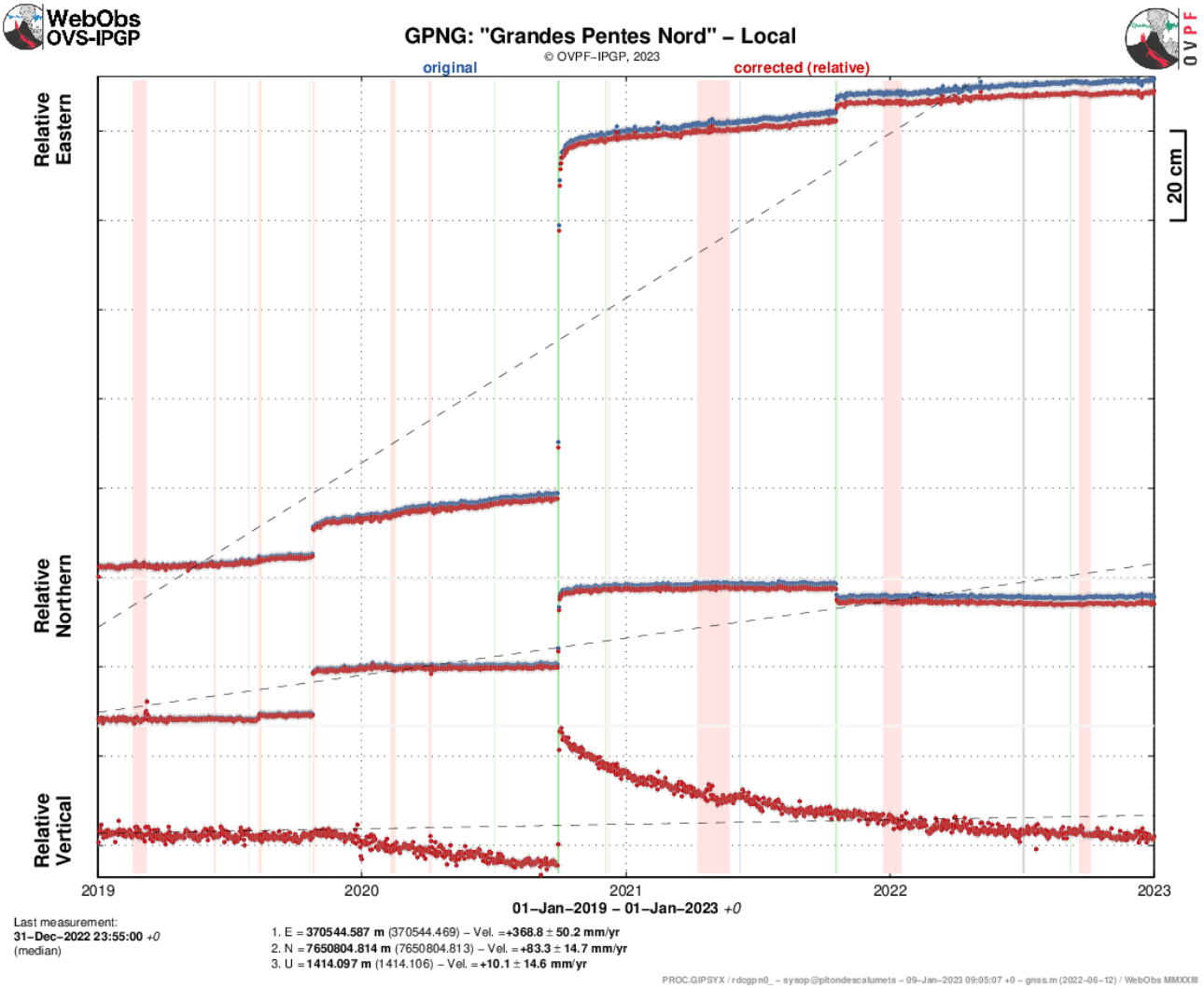


*Figure 26 : Déplacements enregistrés sur la station GNSS "GPNG", localisée dans la partie haute et nord des Grandes Pentes à 1414 m d'altitude entre le 1er janvier 2019 et le 1er janvier 2023 (les périodes éruptives et intrusives sont représentées respectivement en rouge et vert). En bleu les données brutes, en rouge les données corrigées du mouvement de la plaque. (Haut) déplacements est-ouest, (milieu) déplacements nord-sud, (bas) déplacements verticaux.*

### Déformation à court terme liée à l'injection du magma vers la surface

Les déformations lentes à long terme de l'édifice furent interrompues en 2022 par des déformations beaucoup plus rapides correspondant :
- à des phases de déflation de l'édifice lors des phases éruptives liées à la vidange du réservoir de magma superficiel alimentant l'activité de surface (périodes en jaune sur la Figure 27),
- et à la propagation de magma vers la surface (ouverture de dike) qui a conduit à l'éruption du 19 septembre – 5 octobre 2022 (Figure 27).

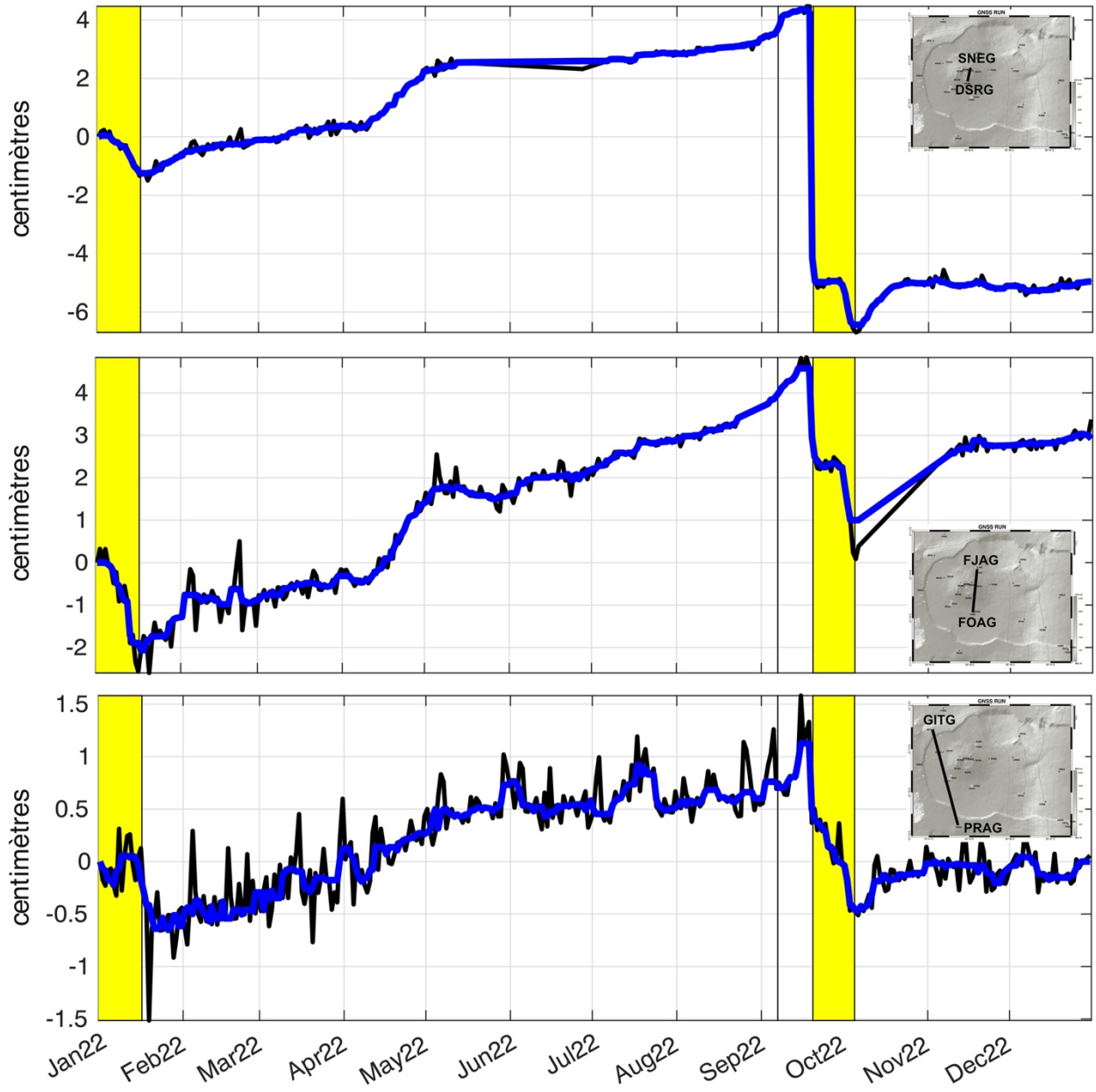


*Figure 27 : Variation de la distance entre deux stations GNSS (lignes de base en cm) du sommet (en haut), de la base du cône (au milieu) et de l'extérieur de l'Enclos Fouqué (en bas) en 2022 (cf. localisation des lignes de base dans les encarts). Les courbes noires et bleues représentent respectivement les données brutes et les données lissées sur une fenêtre glissante de 10 jours. Les périodes jaunes correspondent aux périodes éruptives et les barres noires aux intrusions. Par rapport à la Figure 24, l'ensemble du signal a été conservé pour faire ressortir les déformations à court terme précédant les éruptions de quelques minutes/heures.*

Lors de l'injection du dike vers la surface du 19 septembre 2022, les réseaux de GNSS permanents ont enregistré des déplacements rapides notables de la surface, de l'ordre de la vingtaine de centimètres max., au niveau du cône terminal.
Ceci a pu être également bien caractérisé grâce au réseau de 70 tiges de réitération installées sur le cône terminal et à sa base dont les positions ont été réitérées lors de campagnes de mesures sur le terrain. Ainsi pour cette injection, les données des

campagnes de mesures ont permis de retracer le trajet du magma en profondeur, à partir des déplacements de surface (décimétriques) de part et d'autre de la trajectoire du dike (Figure 28).

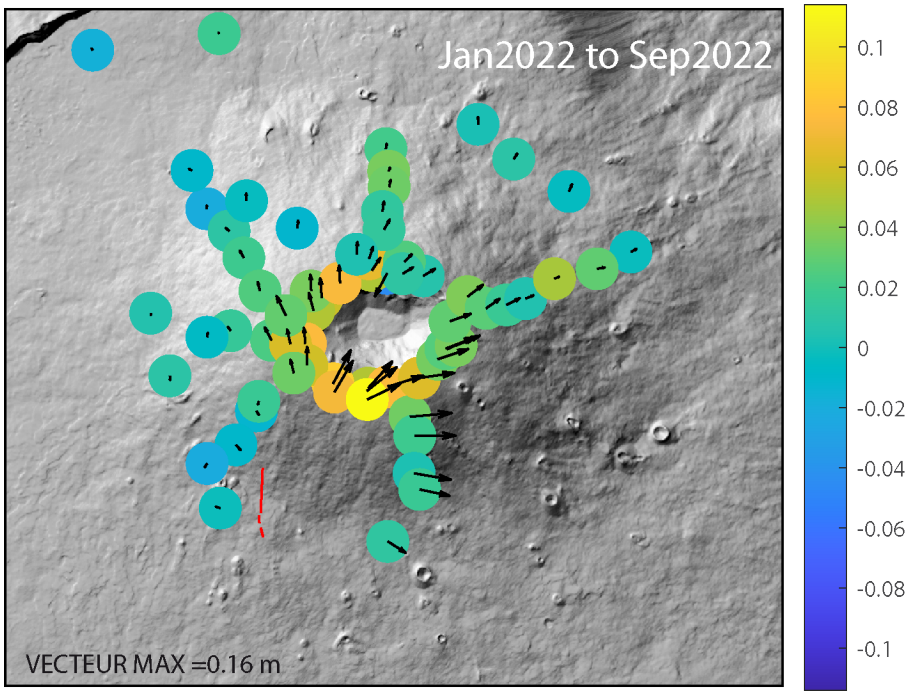


*Figure 28 : Déplacements de surface enregistrés au niveau du cône terminal lors de campagnes de réitération GNSS sur le terrain encadrant l'éruption du 19 septembre – 5 octobre 2022. Les vecteurs représentent les déplacements horizontaux (échelle donnée par la valeur du vecteur maximum en bas à gauche) et les points colorés représentent les déplacements verticaux (échelle donnée par la barre colorée à droite, en m). Les lignes rouges représentent les fissures éruptives qui se sont ouvertes le 19 septembre 2022.*

Ces données montrent bien que pour cette injection de magma vers la surface - et comme pour la majorité des éruptions et des intrusions du Piton de la Fournaise - le dike s'est injecté à l'aplomb de la zone sommitale (sous le cratère Dolomieu) avant de se propager latéralement.

*A noter que la carte des déplacements de surface enregistrés au niveau du cône terminal lors de campagnes de réitération GNSS sur le terrain et encadrant l'éruption du 22 décembre 2021 – 17 janvier 2022 est à retrouver dans le rapport d'activité 2021 de l'OVPF.*

Tout comme le réseau GNSS, le réseau inclinométrique et le réseau extensométrique de l'OVPF ont enregistré les déformations rapides liées à l'injection du dike de l'éruption du 19 septembre – 5 octobre 2022 (Figure 29). Ces deux réseaux présentent l'avantage, du fait de leur transmission en temps réel et de leur facilité d'interprétation (pas de post-traitement nécessaire), de pouvoir déterminer en temps réel la zone du volcan intrudée par le dike lors d'une crise.

Ainsi, ils ont permis de savoir environ 30 minutes avant le début de l'éruption du 19 septembre 2022 que le flanc sud du volcan était intrudé par le magma.

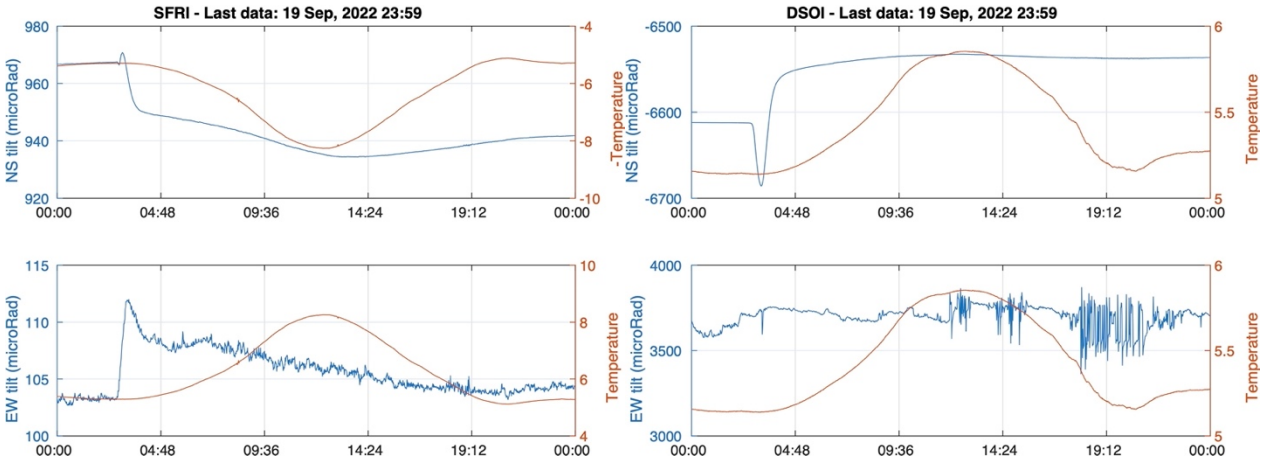


*Figure 29 : Variations de pente (en microradians) enregistrées sur les stations sommitales SFRI et DSOI (composante NS en haut et composante EW en bas) du réseau inclinométrique de l'OVPF le 19 septembre 2022 (les heures sont en UTC). En rouge : la température à l'intérieur du coffret électronique. A noter que la composante EW de la station DSOI est hors service (capteur en buté ou oxydé).*

*A noter que l'illustration des variations de pente liées à l'éruption du 22 décembre 2021 – 17 janvier 2022 est à retrouver dans le rapport d'activité 2021 de l'OVPF.*

***Références :***

*Beauducel, F., A. Peltier, A. Villie, W. Suryanto (2020), Mechanical imaging of a volcano plumbing system from GNSS unsupervised modeling. Geophysical Research Letters, 47, e2020GL089419. https://doi.org/10.1029/2020GL089419*

*Observatoire Volcanologique Du Piton De La Fournaise (OVPF), Institut De Physique Du Globe De Paris (IPGP), Seismic, tiltmeter, extensometer, magnetic and weather permanent networks on Piton de la Fournaise volcano and La Réunion. Dataset (2008), doi:10.18715/REUNION.PF*

*Peltier, A., P. Bachèlery, T. Staudacher (2009), Magma transfer and storage at Piton de La Fournaise (La Réunion Island) between 1972 and 2007: a review of geophysical and geochemical data, J. Volcano. Geotherm. Res., 184(1-2), 93-108*

## 6. Géochimie

- ***Collaborations nationales principales*** : A. Di Muro (OSU-Lyon), M. Ader (IPGP), P. Besson (IPGP) ; P. Burckel (IPGP) ; S. Nowak (P7) ; I. Cocca (P7) ; A. Groleau (IPGP), L. Gurioli (UCA/OPGC) ; D. Jezequel (IPGP), S. Moune (OPGC/IPGP) ; I. Vlastelic (UCA) ; G. Boudoire (UCA/OPGC), S. Thivet (UCA/OPGC) ; P. Bachèlery (UCA/OPGC)

- ***Collaborations internationales principales*** : A. Aiuppa (Univ. Palermo) ; M. Liuzzo (INGV Palermo) ; A. Rizzo (INGV Palermo) ; F. Grassa (INGV Palermo) ; G. Giudice (INGV Palermo) ; S. Gurrieri (INGV Palermo) ; B. Galle (Chalmers Univ., Suède) ; S. Arellano (Chalmers Univ., Suède)

### > Surveillance des émissions gazeuses du massif du Piton de la Fournaise

Le réseau géochimique de suivi des émissions gazeuses du Piton de la Fournaise a été mis en place progressivement depuis fin 2007 par l'OVPF/IPGP avec le soutien de l'INSU, de l'OSU-Réunion et du projet européen NOVAC (http://www.novac-project.eu/partners.htm) et l'apport technique et scientifique de l'INGV (sections de Palerme et de Pise). Ces réalisations ont permis d'inscrire La Réunion dans la liste des sites DECADE du projet Deep Carbon Observatory (DCO).
Le réseau intègre des stations fixes (3 stations MAX-DOAS ; 1 station MultiGaS ; 4 stations de mesure du flux de $CO_2$ par le sol ; Figure 30) et de l'instrumentation portable du même type.

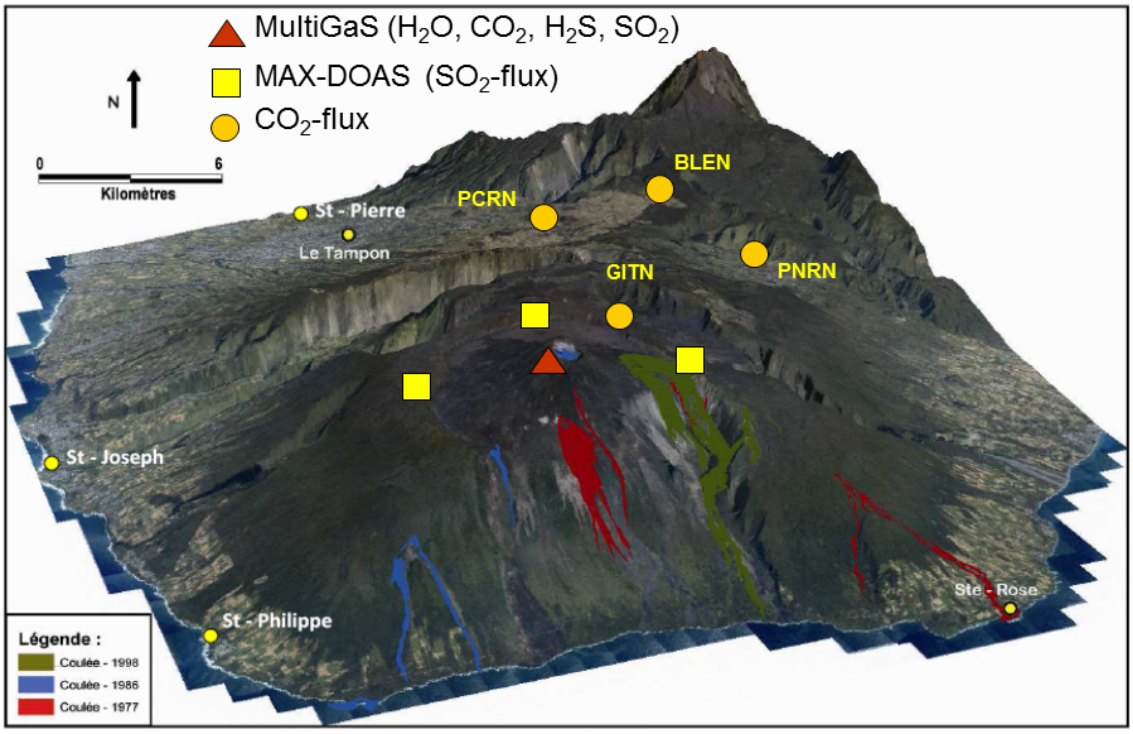


*Figure 30 : Localisation des stations de l'OVPF pour le suivi géochimique des émissions gazeuses sur le massif du Piton de la Fournaise.*

Les stations permanentes sont couplées à des capteurs qui permettent de quantifier les paramètres environnementaux (pression, température, humidité relative, vitesse et direction du vent, pluviométrie). L'analyse et la transmission en temps réel vers l'OVPF des données géochimiques permettent leur interprétation, leur correction en isolant le signal dû aux phénomènes volcaniques du bruit environnemental, leur corrélation avec les paramètres géophysiques (ex. sismicité, déformations) et la définition des conditions initiales pour la simulation numérique des panaches gazeux et des coulées de lave. La réactivation du volcan depuis juin 2014, et les nombreuses éruptions qui ont suivi, ont permis pour la première fois depuis la création de l'OVPF d'acquérir des jeux de données très complets et à haute fréquence sur la composition et les flux des émissions gazeuses du Piton de la Fournaise.

## > Émission de $SO_2$ (Réseau DOAS « NOVAC »)

Les trois stations Scanning DOAS (Spectroscopie par Absorption Optique Différentielle) ont été installées au Piton de la Fournaise dans le cadre du projet européen NOVAC après l'éruption majeure de mars-mai 2007. Les stations sont situées à proximité du rempart de l'Enclos Fouqué entre 3 et 4 km du cône sommital et mesurent (mesures diurnes) l'épaisseur optique de $SO_2$ (ppm.m) dans l'atmosphère sur le sommet du Piton de la Fournaise (angle de scan par rapport à la verticale : 60°).

Le réseau n'a pas subi de modification majeure ces derniers 15 ans. Une panne d'environ 2 mois a affecté la station nord (Partage) entre mai et juin 2022. L'investissement de l'équipe technique de l'OVPF et les échanges réguliers avec nos collaborateurs du projet NOVAC (Équipe de B. Galle et S. Arellano ; Université de Chalmers, Suède) ont permis de remettre l'ensemble du réseau en état de fonctionnement lors de l'éruption du 19 septembre – 5 octobre 2022.

La conversion des mesures d'épaisseur optique en flux de $SO_2$ est possible, à condition d'avoir des contraintes sur la géométrie du panache (hauteur) et sur sa vitesse de dispersion. Cette dernière est considérée comme proche de celle du vent à la même altitude. En première approximation, l'OVPF utilise les données de vitesse et de direction de vent fournies par Météo France, notamment celles acquises sur le site du Gîte de Bellecombe.

Le projet NOVAC a permis d'acquérir une large base de données sur les émissions de $SO_2$ au niveau mondial avec plus de 10.000.000 mesures sur 41 volcans à travers le monde (Figure 31). La distribution des données par le réseau NOVAC est en train d'être finalisée par le groupe de l'Université de Chalmers et pour l'instant reste à la charge de chaque observatoire.

Dans le cadre du projet Européen CAMS-81 (Copernicus Atmosphere Monitoring Service), coordonné par l'ECMWF (European Centre for Medium Weather Forecast), le groupe de Chalmers a relancé une réanalyse homogène de l'ensemble de la base de données acquise à l'échelle mondiale par NOVAC (Arellano et al., 2021 ; Figure 31). Cette base de données acquises au sol a été intégrée et comparée avec celle acquise par satellite (cf. section 7). Elle présente des applications pour les études géochimiques (e.g. bilans globaux et locaux) et géophysiques, pour la quantification du risque, la validation des données satellitaires et les recherches sur le changement climatique et dans le domaine de l'atmosphère. Pour aboutir à cela, l'ECMWF a fourni l'accès aux données météorologiques globales avec une résolution horizontale assez fine (0,125 × 0,125 degrés).

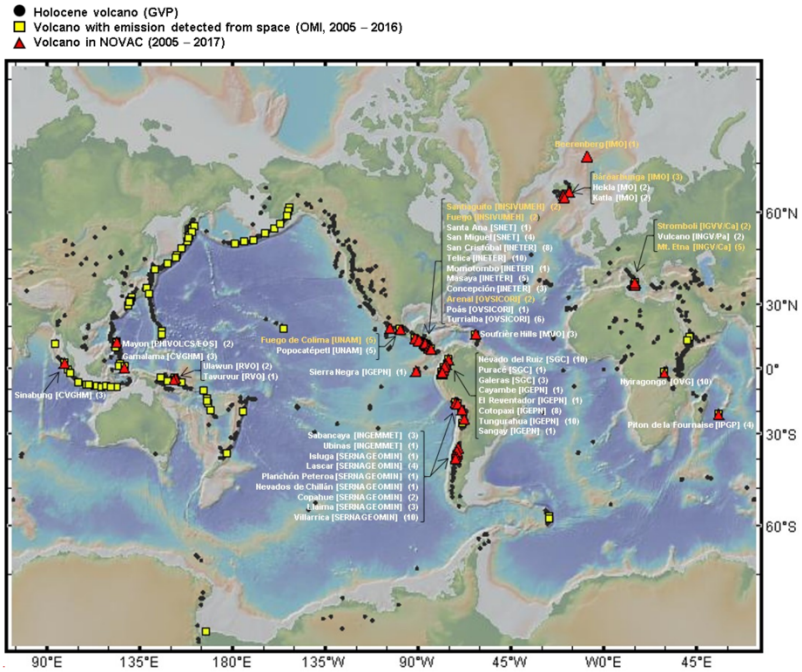


*Figure 31 : Localisation des volcans équipés en scanning DOAS par le réseau NOVAC (triangles rouges) et localisation des volcans dont les émissions en $SO_2$ ont été détectées par satellite (OMI ; Carn et al., 2017).*

Cette réanalyse globale des données de flux de $SO_2$ a permis pour la première fois d'intégrer le Piton de la Fournaise dans le catalogue mondial des volcans actifs en termes de flux gazeux (Arellano et al., 2021). Ce bilan mondial montre que, lors de ses phases d'activité éruptive, le Piton de la Fournaise atteint des taux moyens d'émission d'environ 10 kg/s, qui sont 2 à 4,3 fois plus faibles que les taux d'émissions moyens des grands volcans émetteurs de $SO_2$ (comme par exemple l'Etna, le Popocatepetl ou le Nyiragongo), mais il peut atteindre des taux sensiblement proches de ceux des volcans basaltiques à conduit ouvert tels que le Villarica (Chili, Figure 32).

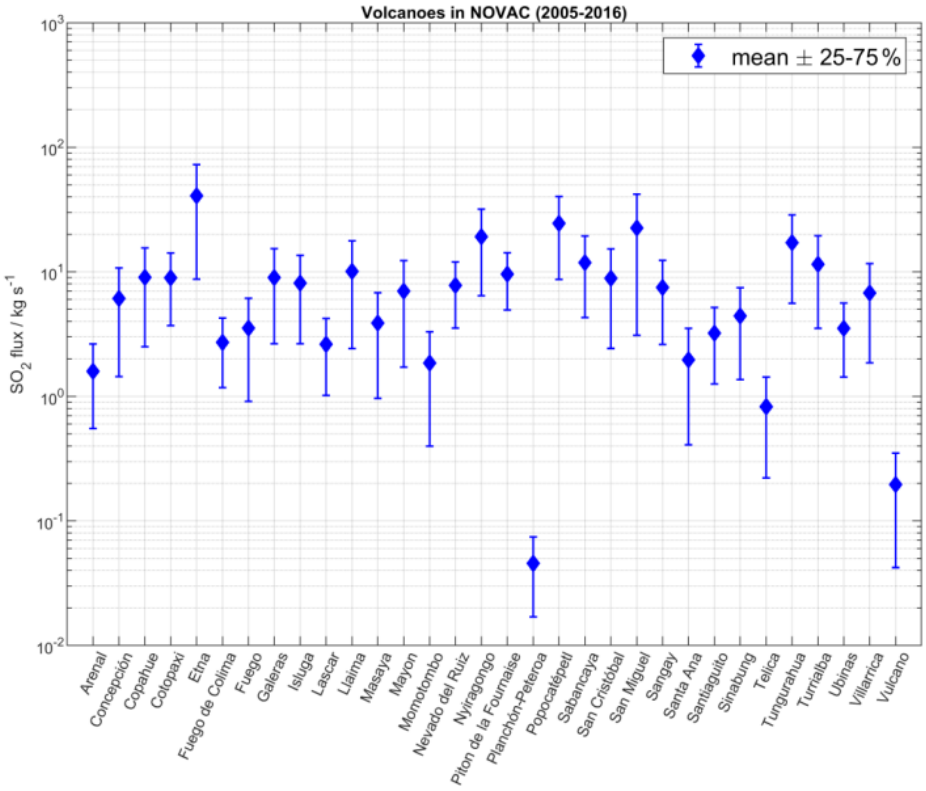


*Figure 32 : Distribution statistique des émissions moyennes journalières des volcans suivis par le réseau NOVAC pour la période 2005-2017.*

Pour l'ensemble de la période 2008 - 2022, le groupe de Chalmers a produit 3 types de réévaluations des jeux de données de l'OVPF, basées sur trois sources de données météorologiques : i) des données ECMWF-ERA-interim ; grille de 0,125 x 0,125 degré, avec un pas temporel de 6h et jusqu'à 60 niveaux verticaux entre le sol et 0,1 hPa ; ii) des données ECMWF-ERA-5 qui ont une résolution spatiale similaire à celle de ERA-interim, mais une résolution temporelle 6 fois supérieure. Ce modèle sera utilisé dans le futur pour le post-traitement des données ; iii) des données GDAS (Global Data Assimilation System) de la NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration – USA), grille de 1x1 degré, avec un pas temporel de 3h et jusqu'à 23 niveaux verticaux entre le sol et 20 hPa.

De façon à valoriser l'investissement effectué par chaque observatoire, les données brutes et réanalysées distribuées par NOVAC sont associées à un identifiant DOI spécifique pour chaque volcan selon des conditions qui garantissent la reconnaissance des « data providers » (Arellano et al., 2021). A terme, les observatoires auront accès en conditions quasi temps réel aux données réévaluées. Chaque observatoire pourra choisir un délai avant la distribution des données acquises en temps réel. Après validation finale, toutes les données seront disponibles à partir d'une base de données NOVAC et d'une base de données ECMWF et seront accessibles avec un identifiant.

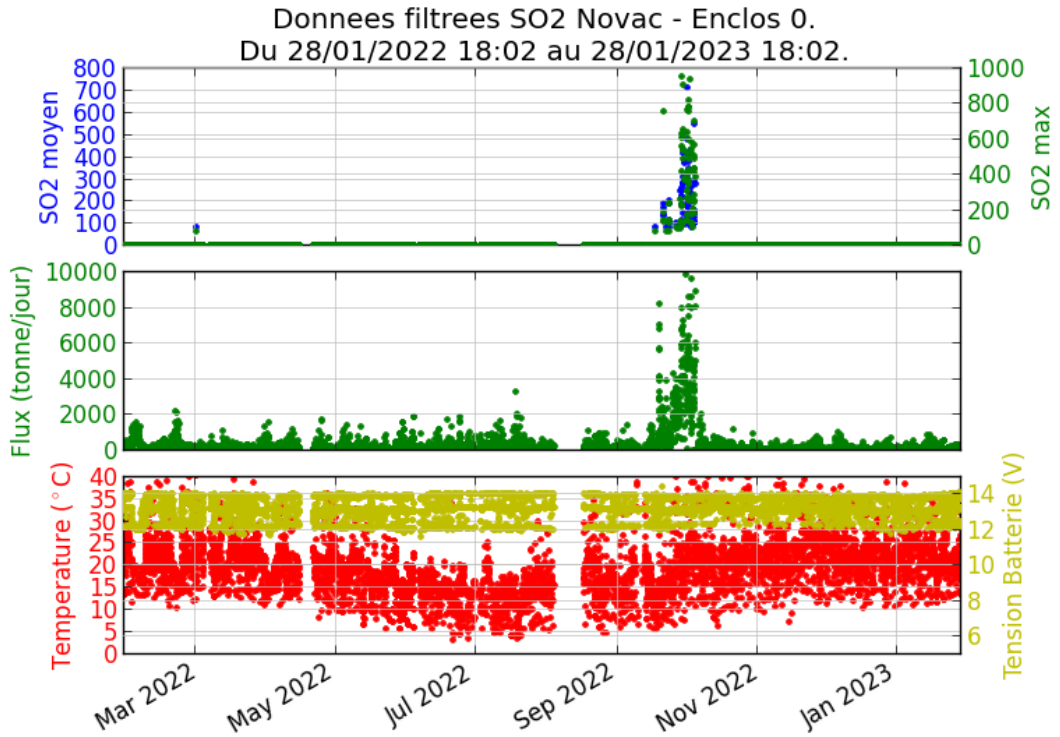


*Figure 33 : Routine de surveillance des émissions de $SO_2$ (Intranet OVPF) – exemple sur l'année 2022 avec la station Enclos 0 (secteur ouest du volcan) ; en haut) Épaisseur optique (ppm.m) de $SO_2$ dans l'atmosphère sommitale du Piton de la Fournaise, mesurée par scanning DOAS. Données filtrées représentatives des détections réelles de $SO_2$. Au milieu) Estimation du flux de $SO_2$ par l'algorithme temps-réel NOVAC sur l'ensemble des données acquises (détections fictives + détections réelles). Le traitement automatique utilise des conditions fixes (hauteur de la colonne : 1 km ; vitesse du vent 10 m/s) qui peuvent induire une surestimation des émissions réelles ; on remarquera la phase de fortes émissions de $SO_2$ lors de l'éruption du 19 septembre – 5 octobre 2022. En bas) Conditions opérationnelles du spectromètre (température dans le boitier, et tension des batteries).*

En 2022, le réseau NOVAC a parfaitement détecté sur les 3 stations l'augmentation des émissions de $SO_2$ associée à l'activité éruptive du 19 septembre - 5 octobre (Figure 33). Notamment, le réseau a permis de mettre en évidence une augmentation significative du flux éruptif lors de la deuxième partie de l'éruption.

A noter qu'avec sa configuration actuelle, le réseau ne permet l'observation des panaches éruptifs que dans 3 directions (nord, sud et ouest). L'installation d'une nouvelle station sur le flanc Est est prévue courant 2023 afin de permettre la couverture de l'ensemble du massif.

### > Mesures Multigas

La quantification du bilan des émissions gazeuses demande la détermination la plus complète possible de leur composition chimique. Le suivi en temps réel des émissions gazeuses du Piton de la Fournaise est effectif depuis 2011 avec la détermination des excès de $H_2O$, $CO_2$, $SO_2$ et $H_2S$ par rapport à l'atmosphère (méthode MultiGaS ; collaboration avec Université de Palerme - A. Aiuppa et INGV de Palerme - M. Liuzzo, S. Gurrieri et G. Giudice). Une station MultiGaS qui effectue 4 comptages/jour d'une ½ heure chacun (site DSON) est installée pour cela au sommet du Piton de la Fournaise. Les mesures de la station MultiGaS permettent la caractérisation des émissions de basse température intra-calderiques et des phases de pollution liées aux panaches éruptifs, tandis qu'une valise portable est déployée à proximité des sites éruptifs pour l'analyse des émissions à haute température (panaches ; fumerolles ; laves).

Depuis l'installation de la station MultiGaS au sommet du volcan, la surveillance en continu des émissions gazeuses du Piton de la Fournaise avait déjà permis de confirmer que i) la vapeur d'eau est le composant principal des faibles émissions sommitales, suivie par le dioxyde de carbone ($CO_2$), ii) le soufre est présent sous forme de $H_2S$ dans les émissions fumeroliennes sommitales, qui ont une température moyenne faible (< 70 °C) pendant les phases de quiescence, iii) d'expliquer les rares pics de $SO_2$ - détectés par le réseau DOAS hors crise éruptive - par l'oxydation de l'$H_2S$ pendant son transport dans l'atmosphère. Le suivi en continu de la composition des émissions fumeroliennes sommitales de basse température a permis de mettre en évidence des variations importantes avant et pendant l'activité volcano-tectonique du Piton de la Fournaise, telles que des augmentations de concentrations en espèces soufrées et en $CO_2$ avant les éruptions.

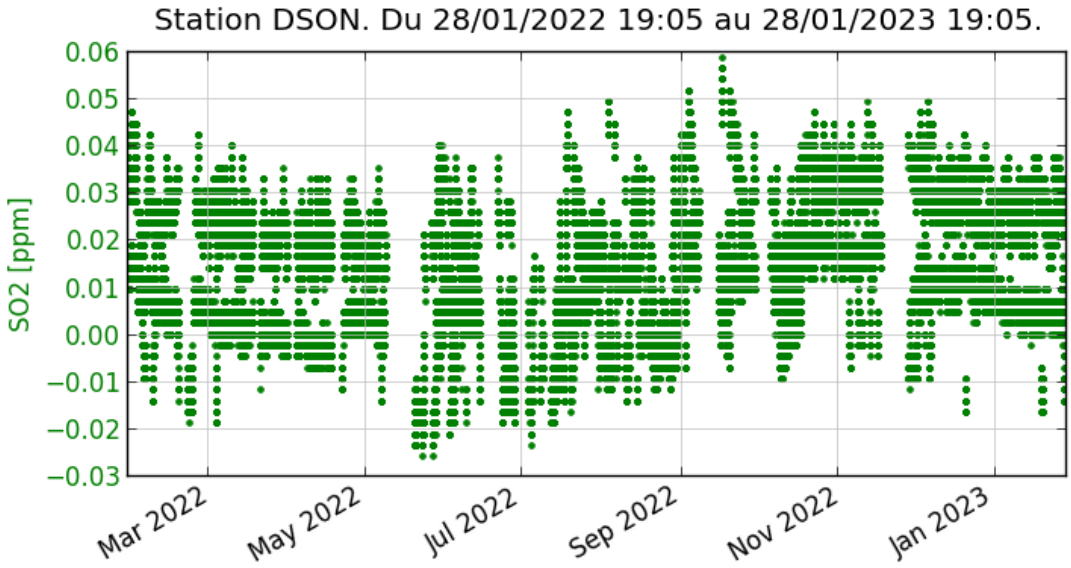


*Figure 34 : Concentrations molaires en $SO_2$ (ppmv) dans l'atmosphère au sommet du Piton de la Fournaise en 2022 mesurées par la station MultiGaS de l'OVPF.*

En 2022, la station MultiGaS a fonctionné de façon relativement continue. Elle n'a pas enregistré d'événement de pollution lié à l'éruption du 19 septembre – 5 octobre (Figure 34).

Le vieillissement des capteurs IR avait déjà dans le passé requis une rallonge des temps de chauffage pour essayer de stabiliser les comptages dès leur début. La station de rechange a été détruite en 2021 lors de son installation en champs proche d'une éruption. La station actuelle montre une instabilité au niveau du capteur $H_2O$ notamment suite aux très forts événements pluvieux et elle demande à être recalibrée. Pour pallier ces difficultés techniques, l'installation d'une nouvelle station est prévue courant 2023.

## > Émissions de $CO_2$ par le sol

Depuis 2012, une cartographie et des analyses chimiques des émissions de $CO_2$ par le sol sont réalisées. Les données acquises montrent que les émissions de $CO_2$ sont focalisées le long des rift-zones, ainsi que le long des failles profondes qui découpent les flancs du Piton de la Fournaise (Liuzzo et al., 2015). Ainsi, les données ont confirmé l'existence d'anomalies concentrées le long des trois rift-zones (NE, SE, NW) identifiées sur le massif du Piton de la Fournaise. Une quatrième zone d'anomalies semble se dessiner le long d'un axe N30-N40 qui sépare les deux édifices du Piton de la Fournaise et du Piton des Neiges.

La cartographie initiale (2013-2015) des émissions de $CO_2$ par le sol avait permis de choisir les sites pour l'installation de trois stations sur le flanc ouest du volcan pour leur suivi en continu (mesures horaires). Une première station est opérationnelle depuis janvier 2013 (PCRN – site OVPF). Une deuxième station a été finalisée en janvier 2014 et a été installée au sein du siège du

Parc National de La Réunion (PNRN), pratiquement à l'aplomb des hypocentres profonds détectés lors de la réactivation du volcan en mars et avril 2014. Une valorisation des données $CO_2$ au sein de la salle pédagogique d'accueil du Parc National a été mise en place en collaboration avec l'équipe du Parc National. Une troisième station a été installée en avril 2015 à l'extrémité nord-ouest de la rift-zone (BLEN - secteur de Piton bleu).
Suite à des campagnes de mesures géophysiques (polarisation spontanée et tomographie électrique) et $CO_2$ effectuées en collaboration avec l'Université de La Réunion sur le secteur du Gîte du Volcan, proche de la caldeira de l'Enclos Fouqué, une station permanente de mesure de $CO_2$ en champ proche a pu être installée en août 2018 (GITN-Gîte du Volcan).

Le réseau est donc constitué d'un pôle « distal » constitué des 3 stations permanentes PCRN, PNRN et BLEN à environ 14 km de distance du cône central. Ce pôle permet de suivre l'évolution temporelle de la concentration du $CO_2$ dans le sol sur le flanc ouest du volcan, dont les variations traduisent des transferts de magma profond. Le pôle « proximal », constitué par la station GITN, vise quant à lui à suivre les transferts de magmas superficiels. Les émissions du sol sur ces stations, ainsi qu'au niveau de points de contrôle correspondant à des secteurs avec de fortes concentrations en $CO_2$ dans les sols, sont également échantillonnés périodiquement en champ proche comme en champ lointain pour des analyses plus complètes.

Les études menées en étroite collaboration avec le groupe de l'INGV de Palerme et dans le cadre de la thèse de G. Boudoire (2017) ont permis de définir des routines pour corriger l'influence des paramètres environnementaux sur le signal géochimique, afin de pouvoir les intégrer aux routines de surveillance de l'OVPF et de les corréler aux séries géophysiques. Ces routines sont en cours d'actualisation dans le cadre du postdoctorat de B. Bénard, notamment pour prendre en compte i) le décalage temporel entre les variations des paramètres environnementaux et leur effet sur les variations de la concentration en $CO_2$ des sols et ii) l'influence des variations du niveau piézométrique des aquifères sur la concentration en $CO_2$ des sols.

D'une façon générale, les concentrations moyennes en $CO_2$ diminuent depuis le site le plus distal (BLEN : jusqu'à 2,5% $CO_2$) vers les sites plus proches (PCRN, puis GITN : jusqu'à 1,3%). La station distale PNRN, située sur le bord nord de la rift-zone N120, enregistre des valeurs très faibles (< 0.2%) typiques des émissions de fond avec une forte signature isotopique organique. Une nette augmentation des émissions en $CO_2$ sol est mesurée sur l'ensemble du pôle distal entre 2019 et 2021 traduisant une réalimentation profonde de magma. Les valeurs les plus importantes sont atteintes lors des éruptions d'avril 2020 (caractérisée par une fin d'activité explosive) et d'avril 2021 (éruption de longue durée, Figure 35). Depuis l'éruption d'avril 2021, cette tendance semble se stabiliser voire s'inverser (diminution des émissions de $CO_2$), suggérant la vidange des réservoirs profonds par le transfert des magmas déjà dégazés vers des niveaux crustaux moins profonds.

En 2022, une augmentation très nette du flux de $CO_2$ a lieu entre avril et mai, traduisant probablement une réalimentation profonde, tandis que l'éruption du 19 septembre – 5 octobre a eu lieu après une phase de diminution, qui pourrait traduire le transfert de ce même magma déjà dégazé vers des niveaux plus superficiels (Figure 36).

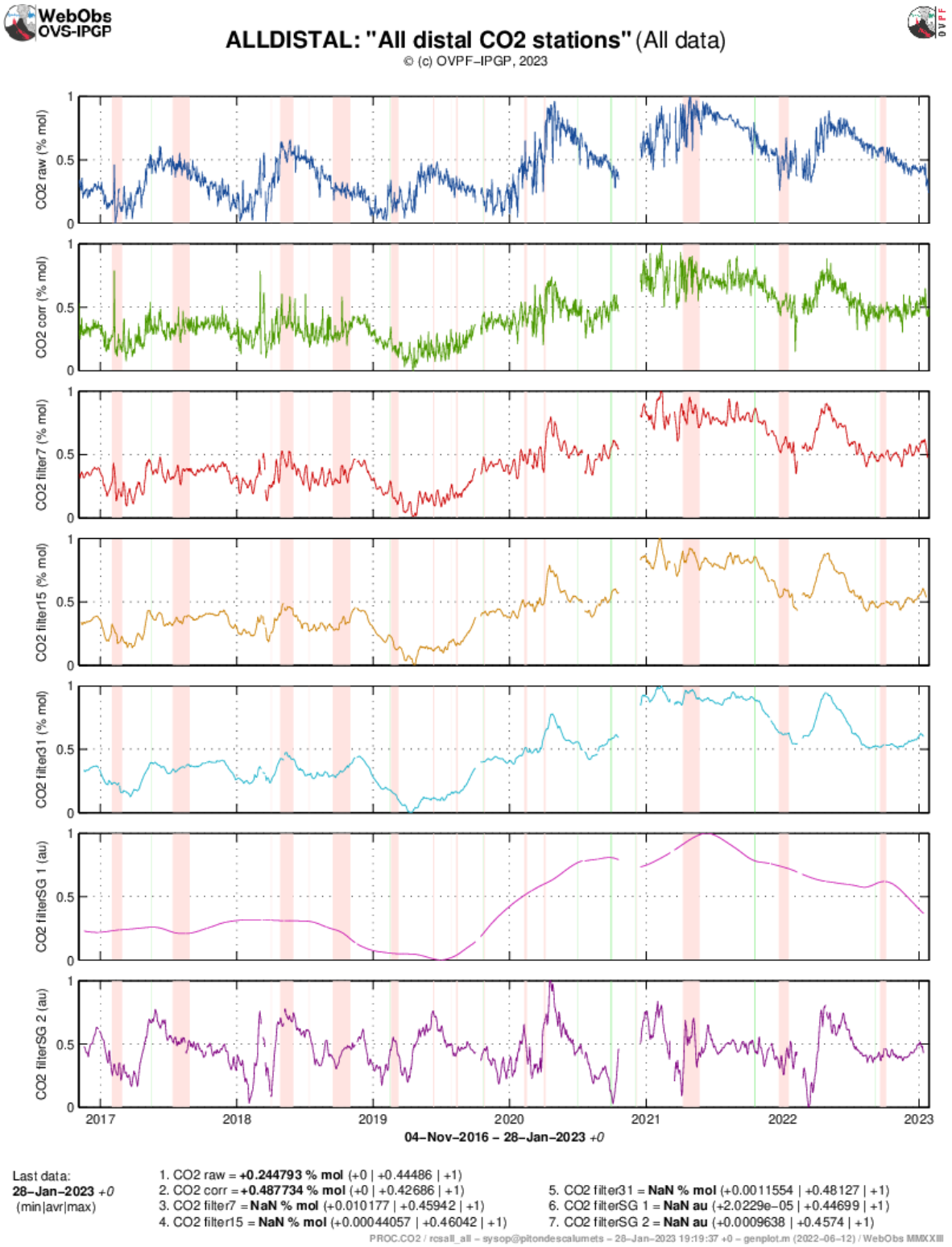


*Figure 35 : Évolution temporelle moyenne des concentrations molaires en $CO_2$ dans le sol (valeurs brutes horaires et données filtrées) sur les sites BLEN, PCRN et PNRN situés sur le flanc ouest du volcan (secteur distal) entre 2017 et 2022. On remarquera la forte augmentation enregistrée par l'ensemble du réseau entre 2019 et 2021. Barres rouges : éruptions. Barres vertes : intrusions.*

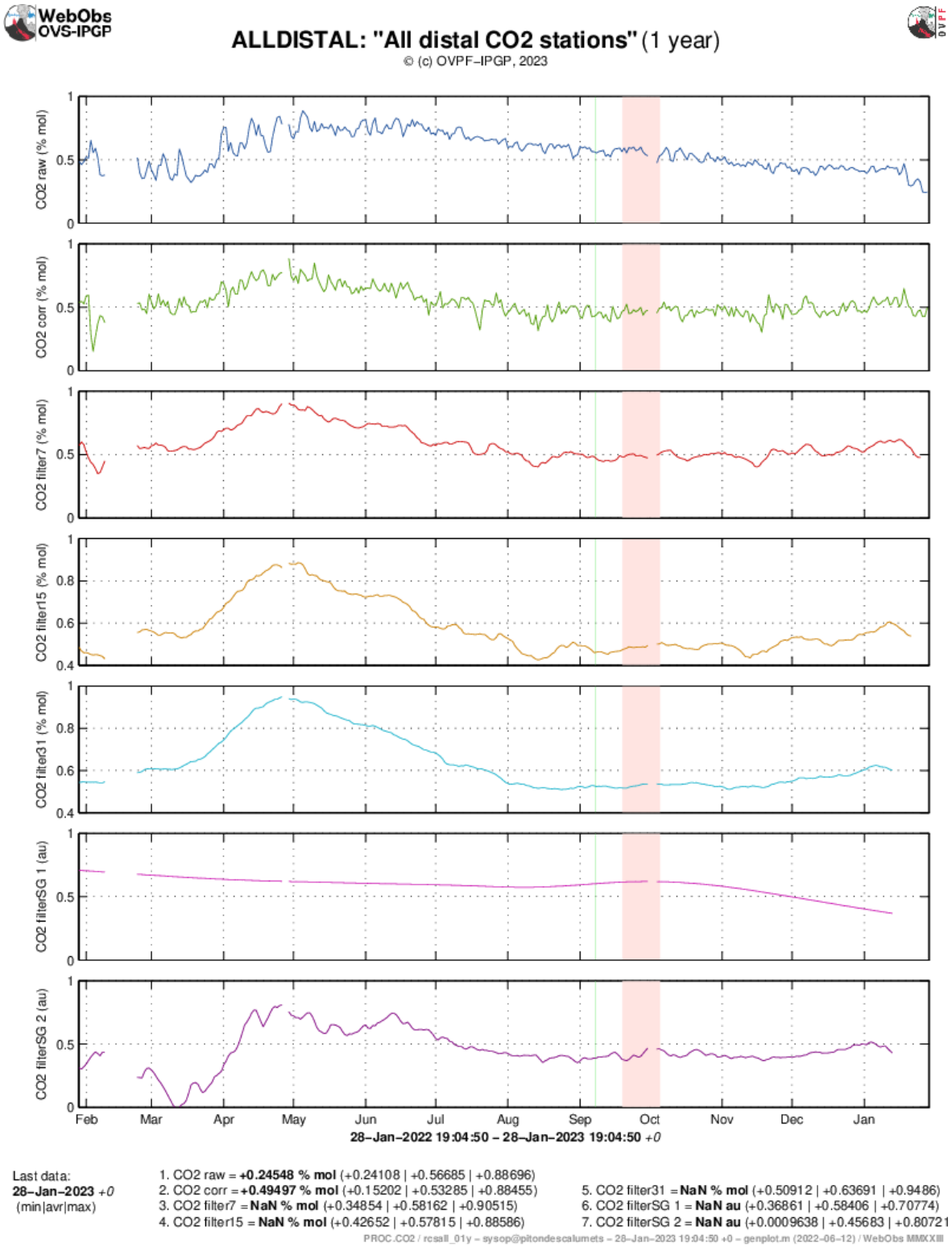


*Figure 36 : Évolution temporelle moyenne des concentrations molaires en $CO_2$ dans le sol (valeurs brutes horaires et données filtrées sur un an) sur les sites BLEN, PCRN et PNRN situés sur le flanc ouest du volcan (secteur distal) en 2022. Barre rouge : éruption. Barre verte : intrusion.*

Depuis 2015, des points de contrôle sur des secteurs plus proches du volcan ont été réitérés régulièrement à l'aide de stations portables. Le site du Gîte (qui comprend la station GITN) situé à 4 km du sommet a ainsi été suivi régulièrement, initialement sur un profil de 10 points de contrôle. Ce site a été mesuré en utilisant deux méthodes distinctes, celle de la concentration dynamique et celle de la chambre d'accumulation. Des échantillons de gaz ont été prélevés régulièrement sur toutes les stations permanentes du réseau OVPF et sur les points de contrôle près du Gîte pour l'analyse isotopique du carbone ($^{13}C/^{12}C$) afin d'identifier et de quantifier de possibles apports en fluides magmatiques (Figure 37).

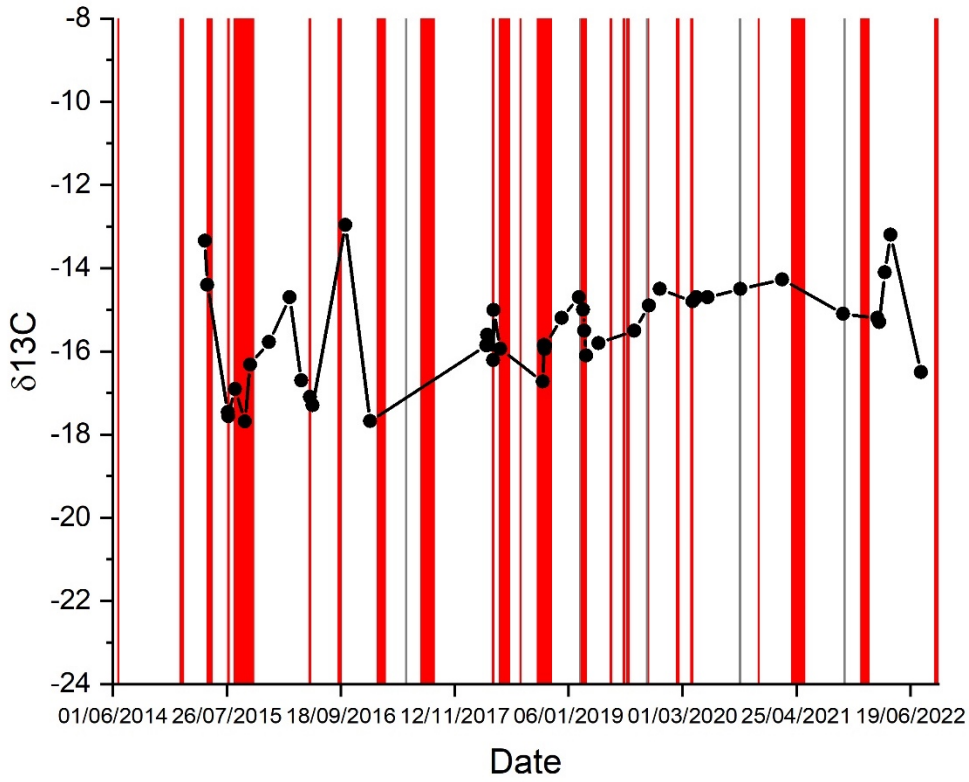


*Figure 37 : Évolution temporelle de la signature isotopique du carbone du $CO_2$ dans le sol (0,5 m de profondeur) mesurée sur le point d'anomalie principal (P0) situé le long du profil de contrôle du Gîte, à 4 km du cône central. Les phases présentant des valeurs moins négatives indiquent une augmentation de la proportion de fluides d'origine magmatique dans les émissions diffuses par le sol. En rouge les éruptions, en gris les intrusions.*

Les données isotopiques montrent de fortes et rapides variations sur la période 2014-2017, puis une plus faible variabilité sur la période suivante avec une augmentation lente et régulière de la valeur du rapport isotopique, correspondant à une augmentation de la quantité moyenne de fluides d'origine magmatique dans les émissions par le sol. L'évolution synchrone de ces tendances sur la plupart des sites surveillés suggère que ces variations sont fonction du taux d'alimentation profonde du système magmatique du Piton de la Fournaise.

### > Caractérisation et suivi des émissions gazeuses sur le massif du Piton des Neiges

Les résultats prometteurs obtenus sur le massif du Piton de la Fournaise, à la fois en champ proche et en champ distal, nous ont poussé à mettre en place des actions et des projets (projets ENVRI+, INSU, OSU de la Réunion) pour la caractérisation des émissions de fluides au niveau du Piton des Neiges (sources thermales ; émissions par le sol).
Des études exploratoires, menées à la fois sur les flancs du Piton de la Fournaise et sur le massif du Piton des Neiges ont permis de tester une large palette de méthodes d'échantillonnage et d'analyse et de définir la meilleure stratégie pour un suivi régulier de ces émissions dans le cadre de la surveillance de l'activité sismo-volcanique de La Réunion.

Un suivi régulier de la composition chimique et isotopique du bullage associé aux trois sources thermales de l'établissement de Cilaos (Irenée, Véronique et Manès) a donc été mis en place depuis juin 2016 (Figure 38).

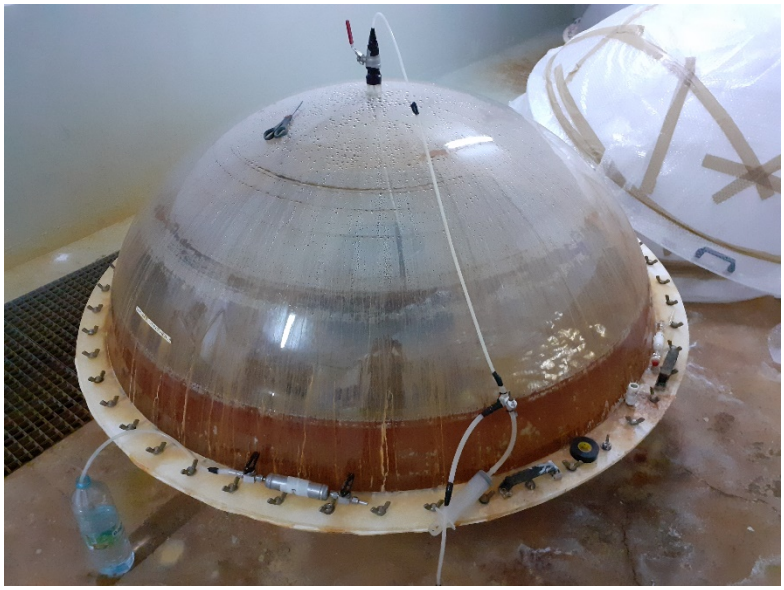

*Figure 38 : Prélèvement de la fraction gazeuse des sources thermales de Cilaos (source Véronique) au sein des anciens thermes de Cilaos.*

Après correction de la contamination atmosphérique, ces gaz montrent une composition relativement homogène et peu variable dans le temps et ils sont composés à plus de 99% de $CO_2$, avec des traces d'autres espèces tels le méthane et les gaz rares (He, Ar, Ne etc).

Le suivi régulier des sources a permis de mettre en évidence i) une évolution dans le temps des rapports entre espèces en traces (e.g. $CH_4$/He), qui pourrait être liée à une variabilité du degré d'interaction entre phase gazeuse et eau mais aussi de la température du système hydrothermal, et ii) une évolution remarquable de la composition isotopique de certaines espèces, notamment celle de l'hélium ($^3$He/$^4$He, exprimé sous forme de rapport par rapport à l'atmosphère R/Ra ; Figure 39).
Dans les zones magmatiques et volcaniques actives, l'augmentation des proportions relatives en $^3$He, et donc du R/Ra, est considérée comme un traceur potentiel des phases de remontées de magmas profonds et riches en gaz.
Nos études ont permis de montrer que le $CO_2$ et l'hélium des sources de Cilaos remontent à partir du système magmatique profond situé sous le Piton des Neiges, à des profondeurs proches ou légèrement supérieures de celle de l'interface entre la croûte océanique et le manteau sous-jacent.

Notre suivi sur la période 2016-2018, qui a été marquée par un certain nombre d'éruptions de moyenne et longue durée (Figure 39), suggère une tendance générale à l'augmentation du rapport R/Ra, entrecoupée de variations rapides. De mi-2019 à fin 2020, période marquée par un nombre important de petites éruptions de courte durée (5 en 2019 et 3 en 2020), on observe une décroissance continue du rapport R/Ra. Depuis 2021, une nouvelle augmentation du rapport R/Ra au niveau des sources de Cilaos s'accompagne d'une augmentation de la durée des éruptions. Ces observations sont cohérentes avec la tendance globale observée dans les émissions de $CO_2$ par le sol sur le flanc du volcan et participe à démontrer qu'une nouvelle phase majeure d'alimentation du système profond a eu lieu et est probablement en train de se stabiliser.

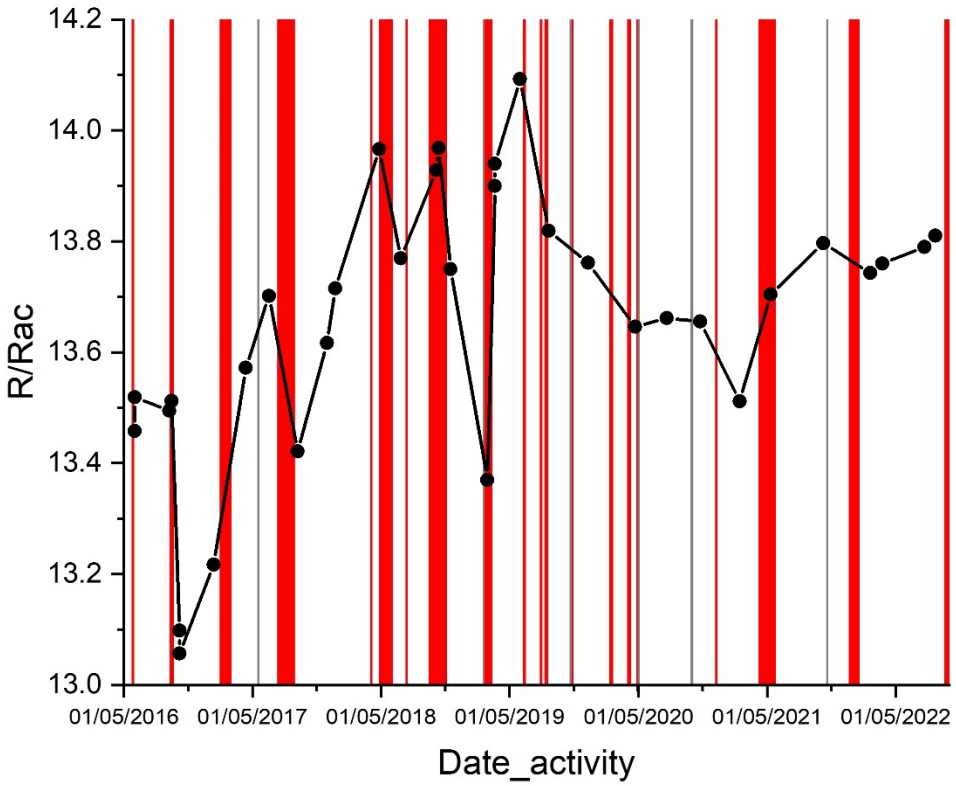


*Figure 39 : Évolution temporelle de la signature isotopique de l'hélium ($^3He/^4He$, normalisé à l'air, R/Ra) dans la fraction gazeuse des sources thermales de Cilaos (source Irenée) au sein des anciens thermes de Cilaos. En rouge les éruptions, en gris les intrusions.*

En conclusion, nos suivis portant sur l'évolution temporelle de la composition des émissions gazeuses des sources de Cilaos, et des fluides émis par le sol indiquent une alimentation magmatique profonde, observable à l'échelle de l'île de La Réunion. Elle serait à l'origine de l'augmentation des durées d'éruptions entre 2021 et 2022 et de l'augmentation des volumes émis en surface. Cette alimentation pourrait être en train de se stabiliser.

## > Composition des produits solides de l'éruption du 19 septembre – 5 octobre 2022

Les échantillons collectés par l'équipe de l'OVPF sont envoyés pour analyses aux laboratoires IPGP (Paris ; Analyses majeurs XRF et traces ICP-MS), OPGC-LMV (Clermont-Ferrand ; Analyses majeurs ICP-AES, traces ICP-MS, propriétés physiques et thermométrie) et au LGL-TPE (Univ. Lyon ; barométrie) et les données sont progressivement intégrées au rapport et aux bases de données à long terme.

L'interprétation des données est basée sur l'ensemble des documents de recherche de référence et peut changer en fonction de l'évolution de la modélisation géochimique et pétrologique.

***> Inventaire et localisation des échantillons collectés lors de l'éruption du 19 septembre – 5 octobre 2022***

Lors de l'éruption, 8 échantillons ont été collectés parmi lesquels deux sont des pyroclastes (lapilli, scorie) et les 6 autres sont des laves qui ont été soit collectées à l'état fondu et vitrifiées sur site (syn-eruptif), soit collectées une fois refroidies (post-emplacement).

| Code | Date mise en place | Date de collecte | Heure de collecte | Type | Texture / Taille | Notes | Localisation | Latitude | Longitude | Altitude (m) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | UTM | | | | | | | |
| REU220921-1 | 21/09/2022 | 21/09/2022 | 11:00 | lava | dense | molten; water quenching | lava stream-fluid lava | -21° 15' 25.5" | 55° 42' 19.4" | 2219 |
| REU220921-2 | 21/09/2022 | 21/09/2022 | 11:00 | lapilli | black-glassy-3-10cm | collected by hands on cone surface | cone, southern flank | -21° 15' 24.1" | 55° 42' 19.2" | 2221 |
| REU220927-1 | 27/09/2022 | 27/09/2022 | 10:30 | bomb | stretched, slightly golden | badly quenched | cone, western flank | -21° 15' 22.6" | 55° 42' 17.5" | 2225 |
| REU220928-1 | 28/09/2022 | 28/09/2022 | 09:00 | lava | dense, black glassy to brownish surface | molten; water quenching; ATTENTION : molten plastic, contamination by walking stick | pahoehoe lava lobe | -21° 15' 34.2" | 55° 42' 54.4" | 2073 |
| REU221006-1 | 05/10/2022 | 06/10/2022 | 12:30 | scoria e | fresh glassy black 3-10cm | collected on the ground | base eruptive cone | -21° 15' 23.94" | 55° 42' 17.67" | 2236 |
| REU221006-2 | 05/10/2022 | 06/10/2022 | 13:00 | lava | stretched and ropy, elongated, glassy surface | glassy pahoehoe crust | surface lava surrounding château fort | -21° 15' 36.66" | 55° 43'02.82' | 2046 |
| REU221006-3 | 05/10/2022 | 06/10/2022 | 13:05 | lava | pahoehoe lobe, squeezed out | glassy pahoehoe crust | surface lava surrounding château fort | -21° 15' 36.63" | 55° 43' 03.65" | 2040 |
| REU221006-4 | 05/10/2022 | 06/10/2022 | 13:10 | lava | surface pahoehoe | glassy pahoehoe crust | surface lava surrounding château fort | -21° 15' 40.10" | 55° 43' 06.17" | 2026 |

*Tableau 6 : Liste des échantillons collectés pendant l'éruption du 19 septembre – 5 octobre 2022 et métadonnées correspondantes.*

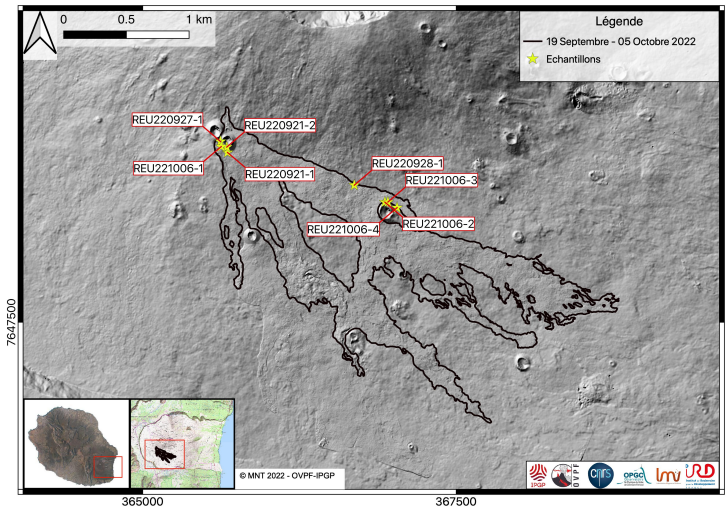


*Figure 40 : Localisation des échantillons collectés lors de l'éruption du 19 septembre – 5 octobre 2022 (cf. Tableau 6).*

***> Propriétés physiques des échantillons***

*Figure 41 : Fragments d'échantillons collectés par l'OVPF lors de l'éruption du 19 septembre – 5 octobre au Piton de La Fournaise.*

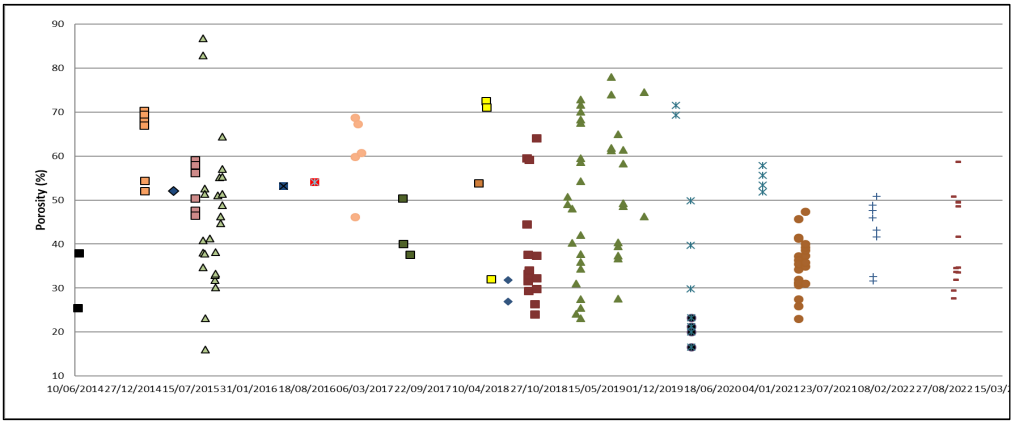


*Figure 42 : Série temporelle de porosité, avec les fragments de lave ayant une vésicularité inférieure à 60%. Les valeurs les plus basses de vésicularité se trouvent dans les fragments trempés.*

| Sample | Type | a | b | c | Wt (gr) | Envelope Volume | Standard deviation | Density | SD | Porosity | Skeleton Volume | Standard deviation | Connectivity |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | (mm) | (mm) | (mm) | (gr) | ($cm^3$) | ($cm^3$) | $gr/cm^3$ | $gr/cm^3$ | (%) | ($cm^3$) | ($cm^3$) | (%) |
| Reu220921_1a | Lava | 32,48 | 26,91 | 22,48 | 23,100 | 16,3112 | 0,1089 | 1,416 | 0,009 | 50,826 | 8,313 | 0,010 | 96 |
| Reu220921_1b | Lava | 28,44 | 21,04 | 21,11 | 13,494 | 6,6412 | 0,0047 | 2,032 | 0,001 | 29,451 | 4,898 | 0,002 | 89 |
| Reu220921_1c | Lava | 22,64 | 22,67 | 17,71 | 8,904 | 4,2741 | 0,0074 | 2,083 | 0,004 | 27,667 | 3,294 | 0,003 | 83 |
| Reu220921_2_1 | Fluidal | 43,76 | 22,00 | 20,24 | 7,256 | 10,705 | 0,0217 | 0,678 | 0,001 | 76,462 | 3,236 | 0,015 | 91 |
| Reu220921_2_2 | Fluidal | 34,50 | 26,00 | 20,94 | 6,366 | 7,2619 | 0,0108 | 0,877 | 0,001 | 69,563 | 2,678 | 0,003 | 91 |
| Reu220921_2_3 | Fluidal | 32,00 | 27,20 | 21,04 | 3,538 | 5,2201 | 0,0124 | 0,678 | 0,002 | 76,469 | 1,845 | 0,003 | 85 |
| Reu220921_2_4 | Fluidal | 32,49 | 25,12 | 20,08 | 4,614 | 5,0554 | 0,0131 | 0,913 | 0,002 | 68,313 | 2,209 | 0,004 | 82 |
| Reu220921_2_5 | Fluidal | 30,00 | 24,08 | 21,71 | 2,575 | 4,5461 | 0,0062 | 0,566 | 0,007 | 80,333 | 1,217 | 0,004 | 91 |
| Reu220927_1b | Bomb golden | 14,64 | 14,06 | 8,03 | 0,786 | 1,0793 | 0,0045 | 0,728 | 0,003 | 74,715 | 0,473 | 0,002 | 75 |
| Reu220927_1c | Bomb golden | 14,42 | 16,06 | 8,04 | 0,997 | 1,2342 | 0,008 | 0,789 | 0,005 | 72,618 | 0,572 | 0,001 | 74 |
| Reu220927_1d | Bomb golden | 28,08 | 25,11 | 20,45 | 4,932 | 5,1632 | 0,008 | 0,954 | 0,001 | 66,872 | 2,612 | 0,003 | 74 |
| Reu220928_1a | Lava | 32,24 | 26,24 | 17,07 | 14,935 | 7,6172 | 0,0064 | 1,961 | 0,002 | 31,924 | 5,338 | 0,002 | 94 |
| Reu220928_1b | Lava | 19,50 | 16,14 | 10,90 | 2,476 | 1,3143 | 0,0048 | 1,884 | 0,007 | 34,587 | 0,874 | 0,001 | 97 |
| Reu220928_1c | Lava | 17,63 | 11,50 | 10,13 | 2,267 | 1,1866 | 0,0112 | 1,911 | 0,018 | 33,660 | 0,803 | 0,002 | 100 |
| Reu221006_1_1 | fluidal | 35,60 | 32,64 | 17,12 | 17,629 | 9,6508 | 0,009 | 1,827 | 0,002 | 36,576 | 6,861 | 0,005 | 79 |
| Reu221006_1_2 | fluidal | 42,24 | 23,07 | 20,51 | 6,691 | 7,3488 | 0,0053 | 0,910 | 0,001 | 68,389 | 3,038 | 0,004 | 86 |
| Reu221006_1_3 | fluidal | 32,01 | 22,51 | 20,83 | 9,986 | 7,6352 | 0,0098 | 1,308 | 0,002 | 54,590 | 4,847 | 0,002 | 67 |
| Reu221006_1_4 | fluidal | 43,76 | 25,00 | 14,65 | 5,930 | 5,0044 | 0,0054 | 1,185 | 0,001 | 58,858 | 2,699 | 0,002 | 78 |
| Reu221006_1_5 | fluidal | 36,51 | 22,69 | 20,00 | 5,894 | 5,5035 | 0,0085 | 1,071 | 0,002 | 62,816 | 2,952 | 0,002 | 74 |
| Reu221006_2a | lava | 32,88 | 11,45 | 7,04 | 11,093 | 7,5044 | 0,0122 | 1,478 | 0,002 | 48,677 | 3,885 | 0,008 | 99 |
| Reu221006_2b | lava | 50,00 | 20,62 | 14,43 | 13,160 | 11,0804 | 0,391 | 1,189 | 0,042 | 58,722 | 4,631 | 0,007 | 99 |
| Reu221006_2c | lava | 41,14 | 30,00 | 22,48 | 16,903 | 11,6593 | 0,0351 | 1,450 | 0,004 | 49,663 | 5,285 | 0,011 | 100 |
| Reu221006_2d | lava | 40,89 | 27,51 | 13,45 | 9,864 | 6,797 | 0,0163 | 1,453 | 0,004 | 49,566 | 3,441 | 0,005 | 100 |
| Reu221006_4a | lava | 53,76 | 33,35 | 25,76 | 31,938 | 16,6917 | 0,0177 | 1,913 | 0,002 | 33,563 | 10,775 | 0,017 | 100 |
| Reu221006_4b | lava | 51,20 | 26,26 | 20,43 | 25,973 | 13,8176 | 0,038 | 1,880 | 0,005 | 34,733 | 8,763 | 0,011 | 100 |
| Reu221006_4c | lava | 29,50 | 14,46 | 8,92 | 3,498 | 2,0832 | 0,0058 | 1,679 | 0,005 | 41,698 | 1,170 | 0,002 | 100 |

*Tableau 7 : Données de densité, de porosité et de connectivité des laves et pyroclastes émis en septembre-octobre 2022 (a, b, c = maximum, intermediate, minimum axis; Wt = weight).*

***> Bilan analyses physiques et texturales des laves et pyroclastes***

***Les laves*** **:**
Les quatre échantillons de lave (Figures 41 et 43) sont denses avec des valeurs de vésicularité allant d'un minimum de 28% à un maximum de 60% (Tableau 6 et Figure 42). Cette variation est plus large que celle des échantillons collectés lors de l'éruption précédente (22 décembre 2021 – 17 janvier 2022). Il convient de noter qu'une fois de plus, les valeurs les plus faibles de vésicularité (23%) ont été mesurées dans les laves trempées, où l'on a également trouvé jusqu'à 17% de vésicules isolées (Tableau 7). Tous les fragments de lave sont presque aphyriques en termes de phénocristaux (<5% ; Figure 43), mais la matrice a un pourcentage de microphénocristaux de 21 à 29 vol.% (Figure 44).

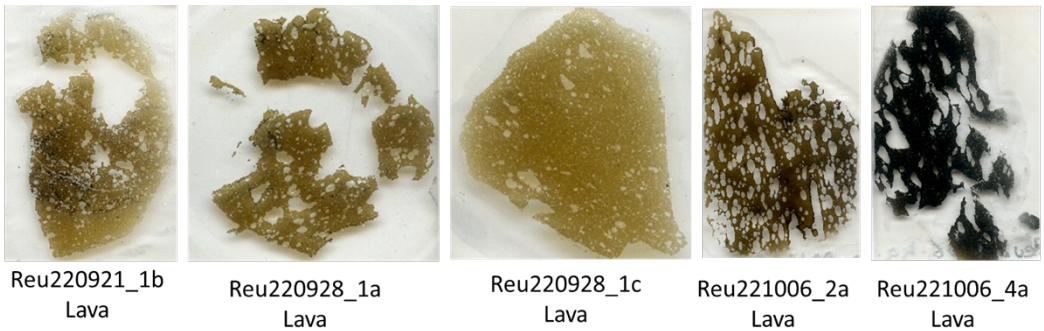


*Figure 43 : Lames minces des quatre fragments de lave. Dans le tableau 7, leurs valeurs de densité, de porosité et de connectivité sont rapportées.*

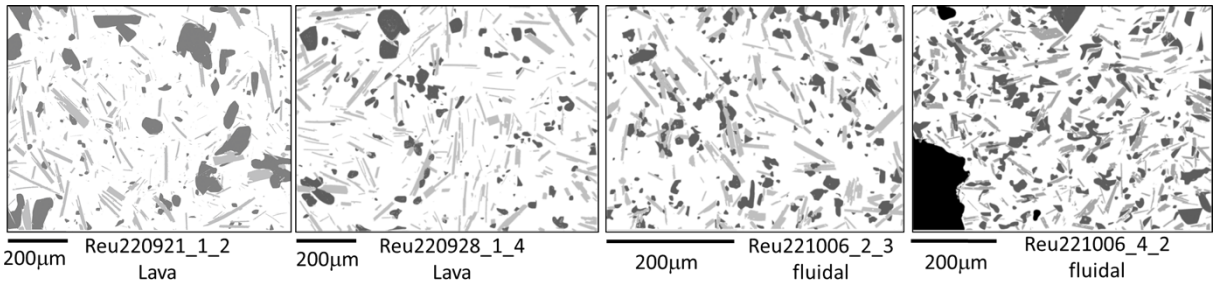


*Figure 44 : Analyse du contenu cristallin des laves obtenue à partir d'images SEM-BSE. Ces images représentent les microphénocristaux (<200µm) de plagioclase (gris clair), d'olivine + clinopyroxène (gris foncé), le verre est blanc et les vésicules sont noires. Les pourcentages de microphénocristaux sont de 26,5, 21,4, 26,4 et 29,7 %, respectivement pour les quatre échantillons.*

**Les pyroclastes :**

Les fragments pyroclastiques mesurés, 15 au total, montrent une vésicularité plus élevée que les laves (Tableau 7) avec les scories "*fluidal*" ayant des valeurs allant de 37 à 76%. Le pourcentage de vésicules isolées est aussi plus important, jusqu'à 33%. Les scories de type "*golden pumice*" sont, comme habituellement, les fragments les plus vésiculés (68 - 80%) avec des valeurs non négligeables de vésicules isolées (jusqu'à 26%). Les pyroclastes ont un contenu élevé de vésicules isolées en accord avec une vitrification dans la fontaine de la lave. La teneur en microphénocristaux est de 12,7 à 13,9 %.

*Figure 45 : Lames minces des pyroclastes analysés, l'une est pour un fragment de type « fluidal » et l'autre « golden pumice ».*

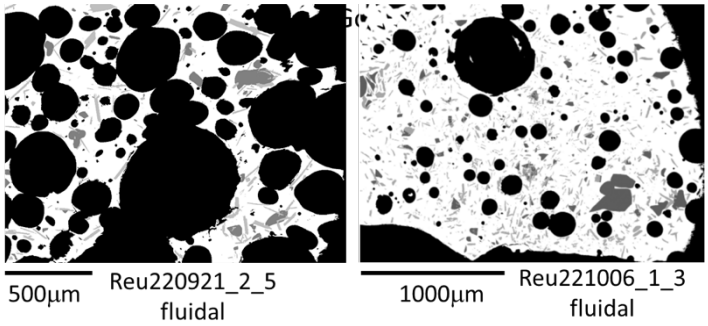


*Figure 46 : Analyse du contenu cristallin des deux fragments de scorie obtenue à partir d'images SEM-BSE. Ces images représentent les microphénocristaux (<200µm) de plagioclase (gris clair), d'olivine + clinopyroxène (gris foncé), le verre est blanc et les vésicules sont noires. Les pourcentages de microphénocristaux sont 13.9 et 12.7 vol. %, alors que les bulles représentent 67 et 21 vol. %, respectivement pour les deux échantillons.*

**> Données pétrologiques**

Les laves émises lors de cette éruption sont presque aphyriques (< 5 wt.% de phénocristaux) avec des microlites de plagioclase, de clinopyroxène zoné et d'olivine. La cristallinité estimée par bilan massique pour l'échantillon REU220921-1 est de 18,8 wt. % (11,5 wt. % de plagioclase, 3,8 wt. % d'olivine, 3,6 wt. % de clinopyroxène). De rares microphénocristaux d'olivine (Mg# = 100(Mg/(Mg+Fe)) = 82-84) contiennent des inclusions de spinelle riche en Cr et de verre. Les compositions des verres et des microlites sont similaires à celles des laves émises lors des précédentes éruptions au Piton de la Fournaise depuis 2020, probablement liées à un stockage magmatique peu profond.

Les verres émis au début de l'éruption (lave vitrifiée REU220921-1, lapilli REU220921-2) sont pauvres en MgO (MgO 5,65-5,77 wt.%), ce qui correspond à de faibles températures pré-éruptives de 1140-1145 °C selon le modèle de Rhéty et al. (2017). Ces valeurs sont cohérentes avec celles mesurées lors des éruptions précédentes depuis au moins décembre 2020. Une légère

augmentation de la teneur en MgO (6,08 wt.%) et de la température (1153 °C) est observée vers la fin de l'éruption (lapilli REU221006-1), suggérant peut-être l'intrusion d'un magma légèrement plus profond, comme observé dans de nombreuses éruptions récentes.

| | SiO2 | TiO2 | Al2O3 | FeO | MnO | MgO | CaO | Na2O | K2O | P2O5 | T (°C) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| REU220921-1 | 50,12 | 3,44 | 12,97 | 12,79 | 0,22 | 5,65 | 10,76 | 2,75 | 0,85 | 0,41 | 1141 |
| REU220921-2 | 50,07 | 3,30 | 13,32 | 12,46 | 0,18 | 5,77 | 10,83 | 2,79 | 0,82 | 0,43 | 1145 |
| REU221006-1 | 50,10 | 3,22 | 13,38 | 12,19 | 0,17 | 6,08 | 10,92 | 2,73 | 0,79 | 0,39 | 1153 |

*Tableau 8 : Composition chimique moyenne des verres analysés sur trois échantillons représentatifs (% en masse d'oxydes) et températures pré-éruptives correspondantes calculées avec le modèle de Rhéty et al. (2017).*

**> Données géochimiques**

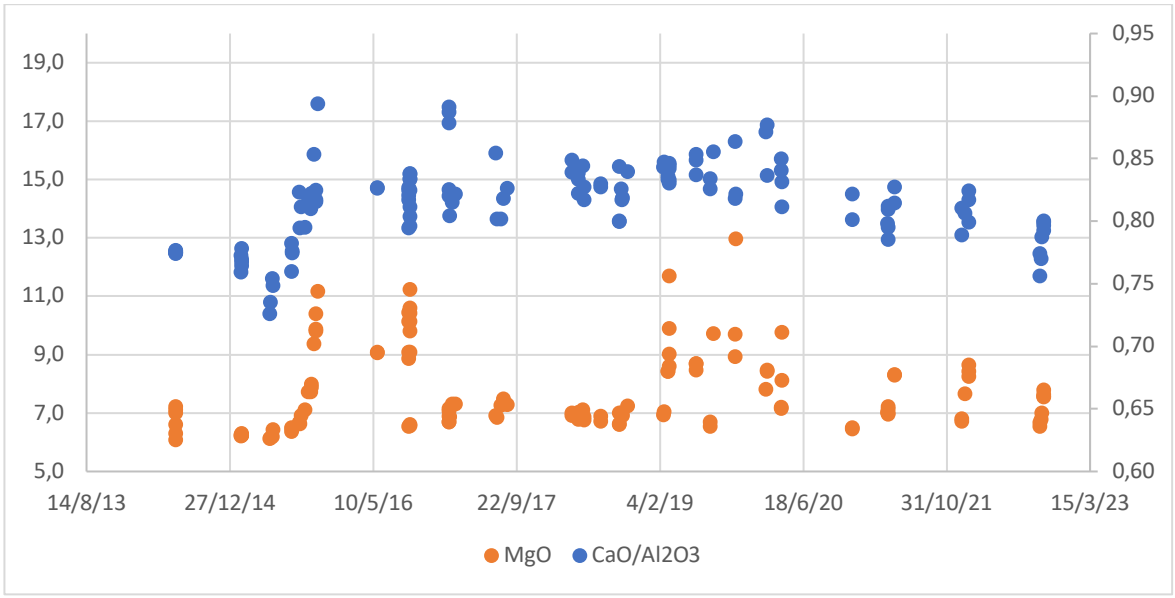


*Figure 47 : Évolution temporelle de la composition roche totale des laves et téphras émis par le Piton de la Fournaise depuis 2014. Les phases à forte teneur en MgO (MgO > 8 % en poids) sont liées à l'augmentation de la quantité de phénocristaux d'olivine. Les phases à faible rapport $CaO/Al_2O_3$ (< 0,79) enregistrent un refroidissement et une cristallisation importants du magma (ex. 2014).*

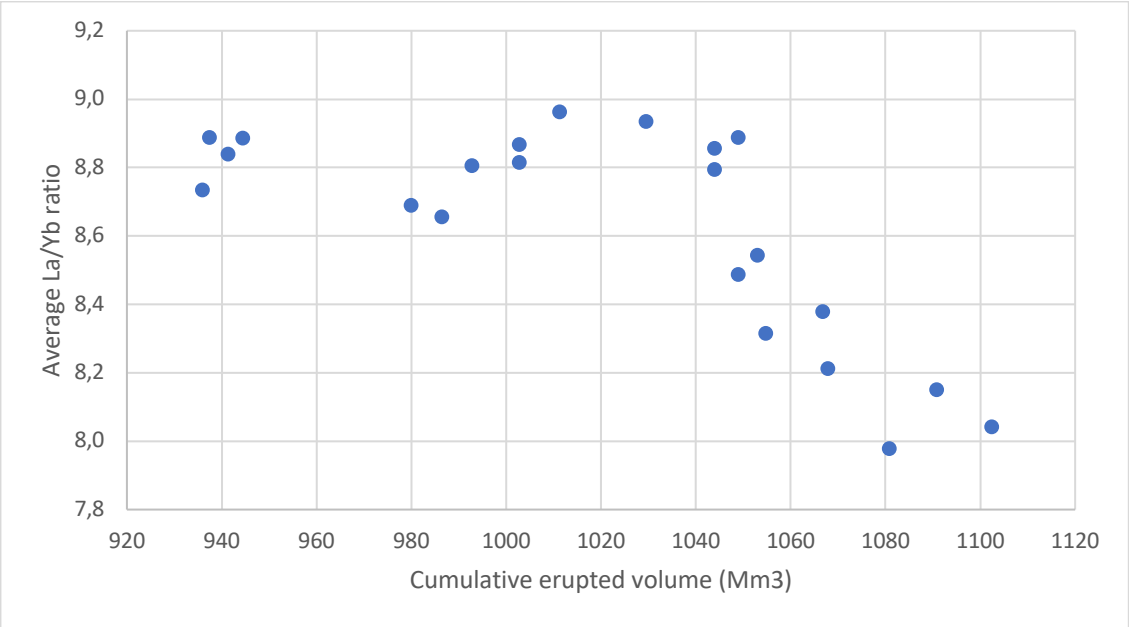


*Figure 48 : Évolution de la composition moyenne de la roche total des laves et des téphras en fonction du volume cumulé émis depuis 2014. Les phases à fort rapport La/Yb correspondent à la fusion d'une source mantellique plus fertile et sont généralement associées à des taux de sortie de lave plus élevés (ex 2015). La diminution des rapports d'éléments traces incompatibles enregistrés depuis 2019 est corrélée à une diminution significative du taux moyen de sortie de lave.*

**> Résumé**

Au total 8 échantillons ont été collectés lors de l'éruption du 19 septembre – 5 octobre 2022 parmi lesquels deux sont des pyroclastes (lapilli, scorie) et les 6 autres sont des laves qui ont été soit collectées à l'état fondu et vitrifiées sur site (syn-éruptif), soit collectées à l'état refroidit (post-emplacement).
Les fragments pyroclastiques montrent une vésicularité de 37 à 76 % avec jusqu'à 33 % de vésicules isolées. Les scories de type « *golden pumice* » sont les fragments les plus vésiculés (68- 80%) avec des valeurs non négligeables de vésicules isolées (jusqu'à 26%). Les échantillons de lave ont une vésicularité plus faible (28-60%) que les pyroclastes. Comme observé précédemment, les laves trempées sur site ont une vésicularité plus faible que les laves collectées post-emplacement et quelques vésicules isolées (17%). **Les données de cette éruption confirment l'augmentation de la densité des produits éruptifs mesurée depuis 2019.**

Tous les échantillons sont presque aphyriques en termes de phénocristaux (<5%) mais la teneur en microphénocristaux varie de 13% dans les pyroclastes à 21- 29 vol.% dans les laves. La composition des verres et des microlites sont similaires à celles des laves émises lors des précédentes éruptions depuis 2020 et indiquent une température pré-éruptive qui varie entre 1140°C au début de l'éruption à 1153°C vers la fin de l'éruption. **Ces faibles températures sont cohérentes avec celles d'un système magmatique peu profond.**

Sur le suivi géochimique à long terme, les laves émises jusqu'à l'éruption du 22 décembre 2021 – 17 janvier 2022 ont une signature intermédiaire $CaO/Al_2O_3$ - indice du degré d'évolution de magma - qui diminue lors de l'éruption du 19 septembre – 5 octobre 2022. Cette tendance pourrait marquer un refroidissement progressif de la partie peu profonde du système magmatique.

Comme souvent observé lors d'éruptions de longue durée, les laves émises en fin d'éruption (échantillons du 05/10/2022) sont légèrement plus mafiques (plus de MgO, rapport $CaO/Al_2O_3$ plus élevé, contenu en Ni et Cr plus élevé) et ont des rapports d'éléments incompatibles légèrement plus élevés que celles émises en début d'éruption. Cette évolution temporelle témoigne des hétérogénéités existant dans le système de plomberie magmatique.
**Ces variations sont corrélées à une légère augmentation de la concentration en MgO des verres, ce qui indique un magma légèrement plus chaud émis vers la fin de l'éruption.**

Les produits de l'éruption de septembre-octobre 2022 ont une signature « appauvrie » (faible rapport La/Yb), qui a été attribuée à la fusion d'une source mantellique plus réfractaire. La diminution de la signature des éléments traces incompatibles amorcée en août 2019 est corrélée à une diminution de 23% du taux moyen de production de lave par rapport à la période 2014-2019.

L'ensemble des données pétrologiques et géochimiques des produits éruptifs du Piton de la Fournaise est à retrouver sur :
. http://wwwobs.univ-bpclermont.fr/SO/televolc/dynvolc/index.php
. http://dx.doi.org/10.25519/DYNVOLC-Database

***Références :***

*Arellano, S. et al. (2021), Synoptic analysis of a decade of daily measurements of $SO_2$ emission in the troposphere from volcanoes of the global ground-based network for observation of volcanic and atmospheric change. Earth System Science Data, 13, 1167-1188.*

*Carn, S. A., V.E. Fioletov, C.A McLinden, C. Li, NA. Krotkov (2017), A decade of global volcanic $SO_2$ emissions measured from space. Scientific reports, 7(1), 1-12.*

*Liuzzo, M., A. Di Muro, G. Giudice, L. Michon, V. Ferrazzini, S. Gurrieri (2015), New evidence of $CO_2$ degassing anomalies on the Piton de la Fournaise volcano and the link with volcano tectonic structures Geochemistry, Geophysics, Geosystems, 16, doi:10.1002/ 2015GC006032.*

*Rhéty, M., A. Harris, N. Villeneuve, L. Gurioli, E. Médard, O. Chevrel, P Bachélery (2017), A comparison of cooling-limited and volume-limited flow systems: Examples from channels in the Piton de la Fournaise April 2007 lava-flow field. Geochemistry, Geophysics, Geosystems, 18(9), 3270-3291.*

## 7. Imagerie et télédétection

- **Collaborations nationales** : OI2/ISDEFORM – OSUL/OPGC/IPGP ; M. Boichu (Univ. Lille) ; D. Coppola (Univ. Turin) ; JL. Froger (ISDeform) ; M. Gouhier (LMV, Univ. Clermont Auvergne, OPGC) ; R. Grandin (IPGP, ISDeform) ; A. Harris (LMV, Univ. Clermont-Auvergne) ; N. Villeneuve (Univ. de La Réunion)

### > L'INSAR (Interferometric Synthetic Aperture Radar)

En 2022 142 images SAR ont été acquises sur le Piton de la Fournaise dans le cadre du Service d'Observation OI2 (100 S1 SM & IW, 18 PAZ SPT, 5 TSX, 19 ALOS2 SPT). Ces données ont permis d'imager les déplacements du sol induits par l'éruption de septembre-octobre 2022 (Figure 49).

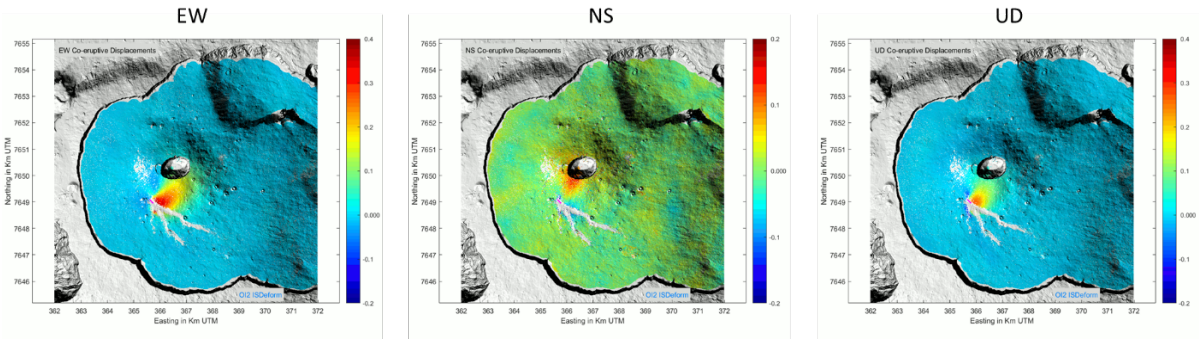


*Figure 49 : Composantes est-ouest, nord-sud et verticale des déplacements du sol induits par l'éruption de septembre 2022 inversées à partir de 8 interférogrammes indépendants (7 interférogrammes ALOS-2 Spotlight et 1 interférogramme Sentinel-1 Stripmap, cf. Tableau 9).*

| Satellite | Acquisition Mode | Acquisition Geometry | Track/Frame | Date DD/MM/YYYY | | Time UTC (HH:MM) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | Master | Slave | |
| ALOS-2 | Spotlight | Ascending Left | 159/6801 | *23/08/2022* | *20/09/2022* | 19:56 |
| ALOS-2 | Spotlight | Descending Right | 56/4073 | *29/07/2022* | *23/09/2022* | 07:23 |
| ALOS-2 | Spotlight | Ascending Left | 157/6811 | *30/07/2022* | *24/09/2022* | 19:42 |
| ALOS-2 | Spotlight | Descending Left | 65/4008 | *15/08/2022* | *26/09/2022* | 08:24 |
| SENTINEL-1 | Stripmap | Ascending Right | S6 | *15/09/2022* | *27/09/2022* | 14:53 |
| ALOS-2* | Spotlight | Descending Right | 60/4041 | *01/09/2022* | *29/09/2022* | 07:50 |
| ALOS-2 | Spotlight | Ascending Left | 161/6790 | *02/09/2022* | *30/09/2022* | 15:37 |
| ALOS-2 | Spotlight | Descending Left | 64/4014 | *07/09/2022* | *05/10/2022* | 08:18 |

*Tableau 9 : Liste des interférogrammes utilisés pour caractériser les déplacements du sol induits par l'éruption de septembre-octobre 2022 et pour cartographier la coulée de lave associée (Figure 50).*

Le Service OI2 a aussi contribué au suivi de la mise en place de la coulée de lave émise pendant l'éruption de septembre 2022. Les produits fournis par le service, combinés avec ceux obtenus à partir de données PlanetScope et avec ceux produits à partir d'imagerie drone (cf. sections suivantes), ont permis de cartographier l'évolution de l'épanchement de la coulée de lave avec un

niveau de précision à la fois spatiale et temporelle sans précédent (Figure 50 ; entre 1 à 3 contours de coulée produit quotidiennement pendant les 16 jours de l'éruption, Chevrel et al., article soumis à Volcanica report).

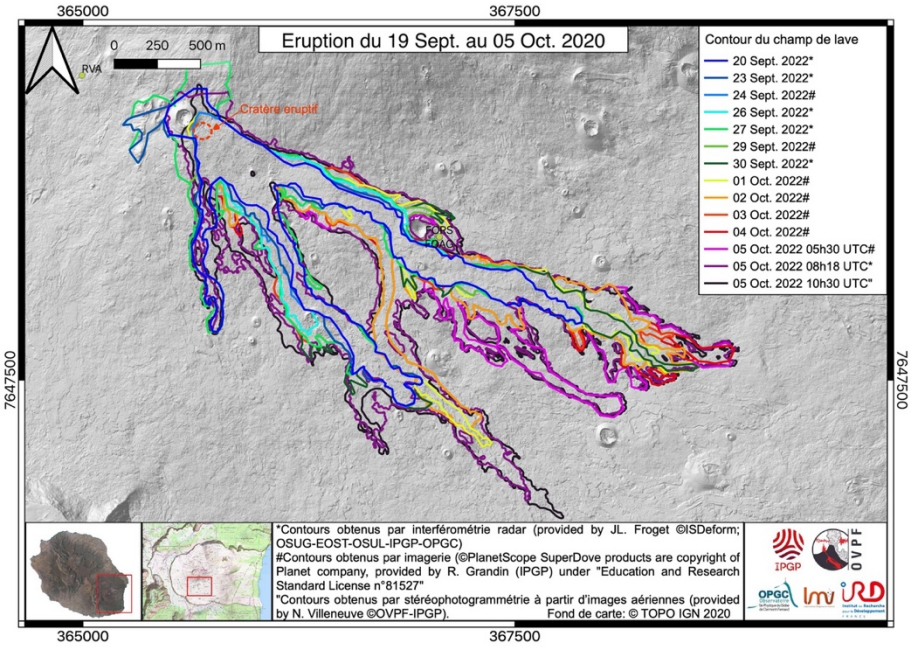


*Figure 50 : Carte de l'évolution des contours de la coulée de lave émise lors de l'éruption du 19 septembre-5 octobre 2022. Les contours pour les dates avec astérisque ont été calculés à partir des données InSAR d'ALOS-2 Spotlight, sauf pour les contours du 27 septembre obtenus à partir des données InSAR de Sentinel-1 (d'après Chevrel et al., soumis à Volcanica).*

Les données ALOS2, PAZ et TSX/TDX acquises sur le Piton de la Fournaise en 2022 l'ont été dans le cadre de nos nouveaux projets (respectivement « 3rd Research Announcement on the Earth Observations JAXA » et « Joint DLR-INTA Scientific Announcement of Opportunity »).

**Articles utilisant les données du SO OI2 publié ou soumis en 2022** :

*Dumont, Q., V. Cayol, JL. Froger, A. Peltier (2022), 22 years of satellite imagery reveal a major destabilization structure at Piton de la Fournaise, Nature Communications, 13, 2649. 10.1038/s41467-022-30109-w.*

*Chevrel, M.O., N. Villeneuve, R. Grandin, JL. Froger, D. Coppola, F. Massimetti, A. Campus, A. Peltier (2022), Report: Lava flow daily monitoring: the case of the 19 September - 5 October 2022 eruption at Piton de la Fournaise, Soumis à Volcanica.*

## > Les images Capella

Trois images radar (Radar à Synthèse d'Ouverture) ont été acquises lors de l'éruption du 19 septembre – 5 octobre 2022 par la constellation Capella. Cette dernière est composée à ce jour de 7 micro-satellites RADAR en bande X (sur la trentaine prévus) orbitant à trois inclinaisons différentes (97°, 53°, 45°) à ~ 500 km d'altitude. Chaque satellite comprend une antenne RSO couplée à un mât et à un réflecteur d'antenne, capable d'acquérir des images dans différents modes et angles d'incidence (15°-45°), avec une géométrie d'observation à gauche ou à droite, ce qui permet d'ajuster l'emplacement de la cible, la taille de l'image et la résolution spatiale (comprise entre 0,5 et 1,2m), tout en maintenant la capacité de revisite quotidienne [Documentation Capella ; https://support.capellaspace.com/hc/en-us/article_attachments/8123254854164/Capella_Space_SAR_Imagery_Products_Guide_v3.5.pdf].
Capella space est une entreprise commerciale californienne fondée en 2016 et qui a lancé son premier micro-satellite en 2020 et son plus récent en janvier 2023.
La géométrie de la constellation permet une acquisition rapide et/ou répétée d'images RSO à haute résolution pour les organisations gouvernementales, commerciales et de recherche. Les données et les autorisations d'affectation ont été accordées

gratuitement aux scientifiques collaborant avec l'OVPF, dans le cadre d'un partenariat de renforcement des capacités avec Capella Space.

Les trois images ont été commandées le 30 septembre et ont été acquises les 1er, 2 et 4 octobre 2022. Les images ont été acquises en mode spotlight, qui fournit la résolution spatiale la plus élevée (taille de pixel <50 cm), pour une couverture de ~5×5 km$^2$. Elles ont été analysées visuellement au niveau de traitement SLC (single-look-complex), qui fournit une vue oblique du sol. Les images SLC n'intègrent pas d'erreur induite par des hypothèses potentiellement incorrectes sur la topographie, mais représentent une vue oblique du sol, ce qui génère des distorsions telles que des superpositions, des raccourcissements ou des ombres dans la topographie. Le niveau de traitement géoréférencé (GEO) a également été utilisé pour la cartographie, ce qui facilite la comparaison avec d'autres informations géoréférencées. Les produits Capella ont été livrés entre 2,5 et 7,5 heures après leur acquisition. Les images ont été acquises en mode "revisite quotidienne", ce qui permet d'obtenir un temps de revisite court en relâchant les exigences relatives à la stabilité des paramètres géométriques. En d'autres termes, toutes les images de Capella sont acquises avec des angles de vue différents, ce qui empêche une comparaison fine des images au jour le jour (et, par extension, rend l'interférométrie d'un jour irréalisable). De plus, en raison de la géométrie de visée oblique du radar, la résolution limitée du Modèle Numérique de Surface utilisé pour le géoréférencement de l'image radar, combinée à une topographie évolutive (due à la croissance du cône éruptif, à l'accumulation des coulées de lave, etc.) conduit à des distorsions géométriques résiduelles substantielles des images GEO (géoréférencées) à petite échelle. **Les images Capella peuvent néanmoins être utilisées pour suivre la croissance du cône éruptif, dont la forme caractéristique est facilement visible sur les images SLC, surtout si des images d'archives acquises avant l'éruption sont déjà disponibles, avec une géométrie similaire (Figure 51, gauche).**

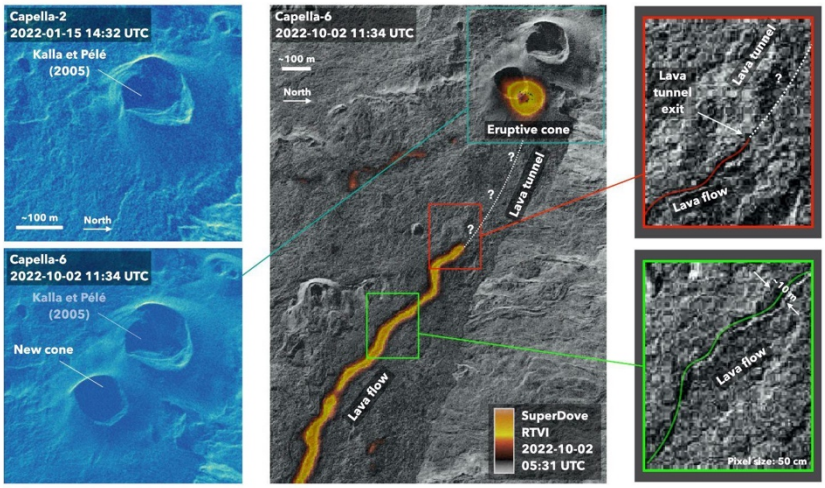


*Figure 51 : A gauche : comparaison de l'imagerie Capella acquise avant (15 janvier 2022) et pendant (2 octobre 2022) l'éruption du 19 septembre – 5 octobre au Piton de la Fournaise. Au milieu : superposition de l'imagerie Capella du 2 octobre 2022 et de l'indice RTVI dérivé de l'imagerie PlanetScope acquise le même jour. A droite : zoom sur l'émergence de la coulée de lave d'un tunnel (en haut) et sur la section principale du chenal de la coulée de lave (en bas). Toutes les images sont montrées ici en version géoréférencée, avec une rotation de 90° dans le sens des aiguilles d'une montre pour faciliter l'interprétation visuelle des caractéristiques topographiques géométriquement déformées (le radar voit la zone depuis l'ouest).*

**Ces images permettent également de cartographier les chenaux de lave ouverts actifs**, fournissant des informations à ultra-haute résolution spatiale complémentaires aux images optiques SuperDove à haute résolution spatiale (Figure 51, milieu). En comparant les images radar et optiques acquises à quelques heures d'intervalle, nous constatons que les coulées de lave actives produisent un contraste marqué sur les images radar à travers la limite entre leurs levées (retour clair) et la partie interne, en fusion, de la coulée de lave (retour sombre). L'emplacement exact des points de sortie des tunnels de lave au moment de l'acquisition peut également être déterminé avec une grande précision (inférieure à 10 mètres).
Grâce à sa capacité de pénétration des nuages, l'inclusion de l'imagerie radar dans la stratégie de cartographie des coulées de lave permet de pallier l'absence d'observations visuelles (depuis le sol ou l'espace) en période de conditions météorologiques défavorables ou en cas d'émissions de panaches volcaniques et de cendres opaques. Cependant, l'interprétation de l'imagerie

radar n'est pas simple, principalement en raison des distorsions géométriques causées par la géométrie de l'imagerie radar à visée latérale, ainsi que du faible contraste qui apparaît souvent entre la couverture terrestre préexistante et les matériaux volcaniques nouvellement déposés. Cette dernière limitation est cependant contrebalancée par la très haute résolution spatiale et la haute sensibilité radiométrique du système Capella.

> L'optique

**Stéréophotogrammétrie à partir d'images drone et ULM**

*[Nous ne discutons ici que de l'éruption qui s'est déroulée dans son entièreté en 2022, à savoir l'éruption du 19 septembre – 5 octobre 2022]*

Le relevé aérien est un moyen efficace d'acquérir les caractéristiques morphologiques d'une zone éruptive (évents et coulées de lave). Que ce soit à partir d'un avion, d'un hélicoptère, d'un ULM ou d'un drone, les photographies aériennes peuvent être assemblées pour construire des images orthomosaïques géoréférencées à partir desquelles les contours des coulées de lave peuvent être extraits. Cette technique utilisant des photographies aériennes (c'est-à-dire l'application de la stéréophotogrammétrie) peut également être appliquée pour reconstruire la topographie et produire un modèle numérique de surface (MNS) local du champ de lave. Pour cela, nous utilisons le logiciel Agisoft Metashape (V2.0.0). La différence entre le MNS produit après la mise en place de la coulée de lave et le MNS avant la mise en place, considéré comme une référence, permet de calculer les épaisseurs différentielles et le volume de la coulée de lave nouvellement mise en place.
Les levés effectués à partir de drone sont plus adaptés pour les zones de moins de 1 $km^2$ (cartographie des caractéristiques locales, des zones d'évent, des fronts d'écoulement, etc.). Pour les zones supérieures à 1 $km^2$, ce qui est généralement le cas pour les champs de lave, des relevés photographiques aériens à bord d'ULM sont effectués dès que les conditions météorologiques le permettent (Derrien, 2019 ; Derrien et al., 2018). Des relevés ponctuels par drone sont également effectués, mais pas de manière systématique car les sites d'éruption peuvent être à plusieurs heures de marche.
Lors de l'éruption du 19 septembre au 5 octobre 2022, le DJI mini (résolution de 12 Mpix) a été utilisé le 28 septembre pour acquérir 154 images (79 en vue oblique prises en décrivant un cercle de 90 mètres de rayon centré sur l'évent principal et 75 en vue verticale) et le DJI Mavic 3 (résolution de 12 Mpix) a été utilisé le 3 octobre pour acquérir 55 images en vue verticale. Deux relevés ULM ont également été effectués les 24 septembre et 5 octobre au cours desquels 655 et 812 images ont été acquises, respectivement, en vue verticale et oblique (angle <30°) avec une caméra Canon Mark III 5DSR (50 Mpix) en format brut (CR2 pour Canon). Chaque photographie est associée à un fichier Exif qui comprend les coordonnées et la hauteur au-dessus de l'ellipsoïde en utilisant un dispositif GNSS Canon. Les erreurs de positionnement, dues au mode de positionnement et à la vitesse de l'appareil, sont de l'ordre de 15 à 23 mètres dans les modèles produits (DSM et orthomosaïque). Afin de corriger cette erreur, le logiciel Cloudcompare (www.cloudcompare.org) a été utilisé pour superposer la partie extérieure de la nouvelle coulée de lave sur un DSM (Digital Surface Model) de référence.

**Pour l'éruption du 19 septembre – 5 octobre 2022, la stéréophotogrammétrie a permis de suivre l'évolution de la coulée de lave mais aussi la morphologie du cône éruptif en cours d'édification.** La morphologie du cône éruptif principal a changé de façon spectaculaire au cours de l'éruption (Figure 52). Le premier ensemble de données acquises par stéréophotogrammétrie le 24 septembre montrait un évent principal haut de 18,6 m, de 71,7 m de diamètre à sa base et de 27,6 m de diamètre en partie haute ; et un cône latéral au sud de plus petite taille de quelques mètres de haut (Figure 52). Le relevé du 28 septembre, alors que l'activité éruptive était plutôt faible, montrait une croissance du cône principal de quelques mètres (25,3 m de haut et 75,8 m de large à la base) et un rétrécissement de son sommet, se refermant presque, avec une taille de cratère de 8,3 m. Le cône latéral n'avait pas changé de manière significative (Figure 52).
L'augmentation de l'activité observée le 29 septembre a été accompagnée d'une forte activité de fontaine de lave qui a contribué à la croissance et à l'élargissement significatifs de l'évent principal au cours des jours suivants. Le 3 octobre, le cône avait atteint une hauteur de 36,5 m, doublé le diamètre de sa base (142,4 m) et formé un grand cratère de 74,4 m de diamètre (Figure 52). La croissance du cône a recouvert et englobé l'évent secondaire. Deux jours plus tard, lorsque l'éruption s'est terminée, il ne restait de cet évent secondaire qu'une petite cicatrice sur le cône principal. Le cône principal a atteint une hauteur de 41,4 m avec une base de 158,4 m et un diamètre de cratère de 81,2 m, similaire à son voisin Piton Kalla et Pellé (Figure 52).

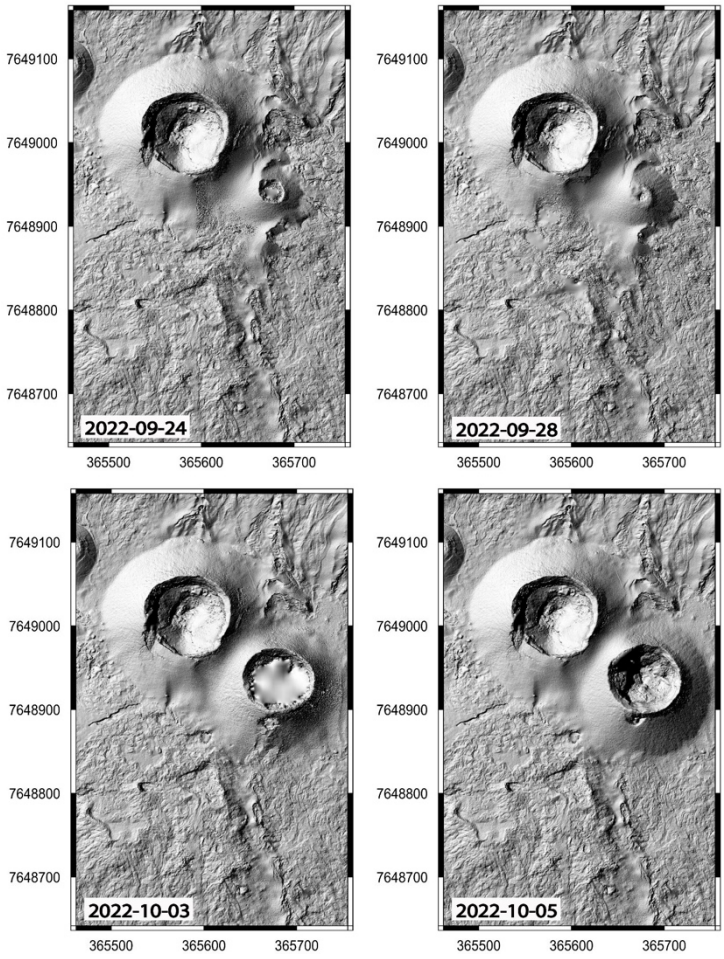


*Figure 52 : Reconstruction morphologique 3D de l'évent éruptif formé lors de l'éruption du 19 septembre – 5 octobre 2022 (Piton Tikal, à droite sur les images) à l'est du Piton Kalla et Pélé (à gauche sur les images) issu de l'éruption d'août-octobre 2015. Les images ont été obtenues par stéréophotogrammétrie à partir d'images aériennes (ULM pour le 24 septembre et le 5 octobre, et drone pour le 28 septembre et le 3 octobre. Les dates d'acquisition sont indiquées sur les images.*

**Pour l'éruption du 19 septembre – 5 octobre 2022, la stéréophotogrammétrie réalisée depuis un ULM a permis à deux reprises de cartographier les contours de la coulée (Figure 50, section précédente) mais également de produire un MNS mis à jour. En comparant ce dernier avec la précédente édition (post-éruption de décembre 2021), une carte des épaisseurs a été réalisée (Figure 53) ainsi qu'un calcul du volume total de lave émise. Ce sont 11,62 millions de $m^3$ qui ont été émis en 16 jours (soit 8,36 $m^3s^{-1}$) couvrant une surface de 1,84 millions de $m^2$.**

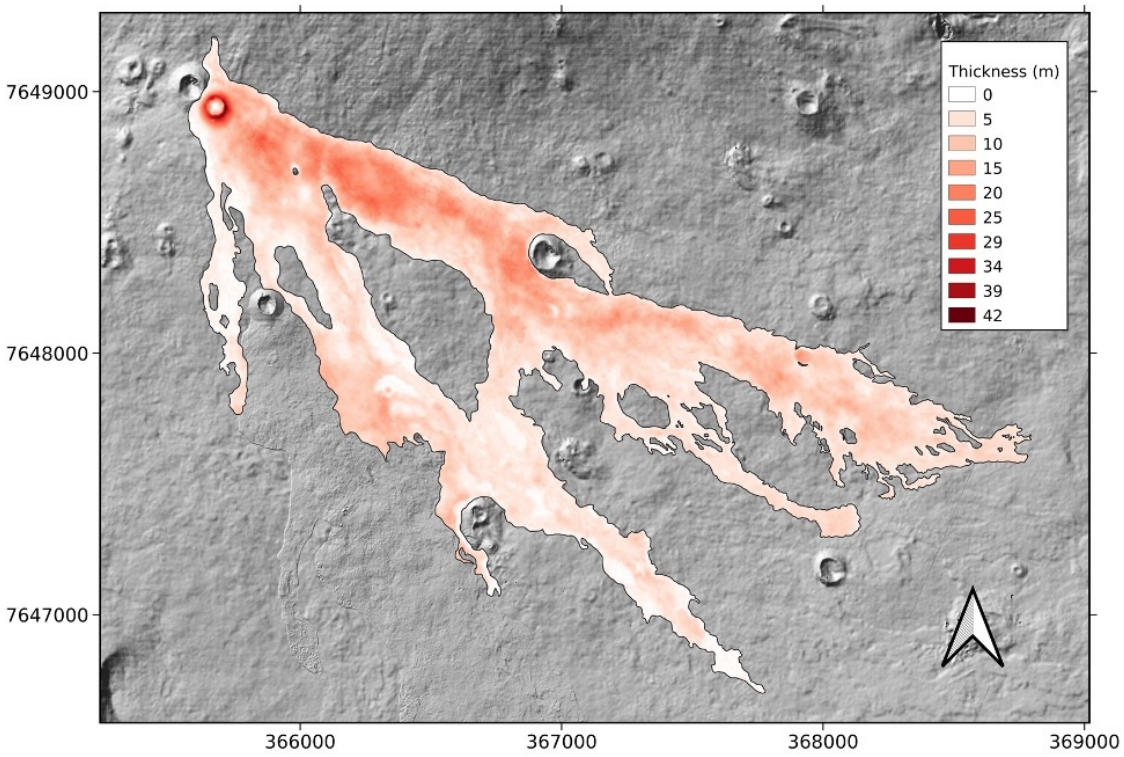


*Figure 53 : Carte des épaisseurs de la coulée de l'éruption du 19 septembre – 5 octobre 2022 obtenue à partir de la comparaison d'un MNS postérieur à l'éruption de décembre 2021 et de celui présenté au-dessus (5 octobre 2022).*

**Images de la constellation PlanetScope**

Pour la première fois au Piton de La Fournaise, des images optiques à haute résolution acquises quotidiennement par des micro satellites commerciaux de la constellation PlanetScope ont été utilisées lors d'éruption du 19 septembre – 5 octobre 2022.
Les données ont été fournies gratuitement aux partenaires scientifiques de l'OVPF dans le cadre du "Programme d'éducation et de recherche" [https://www.planet.com/markets/education-and-research/].

La constellation est composée de plus de 100 nanosatellites "SuperDove" en orbite héliosynchrone à 500 km d'altitude, qui acquièrent des images vers 10h00 RET (06h00 UTC). L'imagerie est acquise par une caméra avec une géométrie de vue au nadir, échantillonnée à un espacement de 3 mètres entre les pixels. Le système optique est sensible à huit bandes spectrales, dont sept bandes visibles dans la gamme 431 nm - 713 nm, et une bande proche infrarouge (NIR) couvrant la gamme 845 nm - 885 nm [https://assets.planet.com/docs/Planet_Combined_Imagery_Product_Specs_letter_screen.pdf].

Les produits sont livrés aux utilisateurs environ 24 heures après l'acquisition. Des images traitées au niveau de la "réflectance de surface" (intégrant des corrections géométriques et radiométriques - orthorectification et transmission atmosphérique, Tu et al. 2022) ont été commandées afin de suivre les coulées de lave.

Pour mettre en évidence le contour des coulées de lave et faciliter la cartographie des coulées de lave, trois combinaisons différentes de bandes spectrales SuperDove ont été construites (Figure 54) :
- une composition RVB en fausses couleurs utilisant les bandes R=8 (NIR, 865nm), G=4 (vert, 565nm) et B=2 (bleu, 490nm),
- un indice de végétation par différence normalisée (NDVI) (Rouse et al. 1974) utilisant les bandes 6 (rouge, 665nm) et 8 (NIR, 865nm) : (R NIR - R RED )/(R NIR + R RED ),

- un indice de végétation triangulaire à bord rouge (RTVI) (Chen et al. 2010) utilisant les bandes 4 (vert, 565nm), 7 (bord rouge, 705nm) et 8 (NIR, 865nm) : 100(R NIR - R RED-edge) - 10(R NIR - R GREEN).

De manière heuristique, nous avons constaté que les indices NDVI et RTVI fournissent des contrastes suffisamment clairs à travers les limites des différentes coulées de lave, grâce au rayonnement incandescent de la lave active émettant dans le proche infrarouge. Au total, nous avons analysé 9 images sans nuage au cours de l'éruption (24, 26, 27, 29 septembre et 1, 2, 3, 4, 5 octobre), dont 7 ont été utilisées pour extraire les contours (voir exemple Figure 54).
Des combinaisons spectrales alternatives incorporant des bandes spectrales s'étendant plus profondément dans le domaine de l'infrarouge à ondes courtes (SWIR) peuvent être mieux conçues pour mettre en évidence le rayonnement thermique de la surface de la coulée de lave. De telles combinaisons spectrales sont accessibles aux satellites Sentinel-2 (Plank et al. 2019), mais qui fournissent malheureusement des images à plus faible résolution spatiale (20 mètres dans le domaine SWIR) et temporelle (5 jours de revisite). En comparaison, les instruments PlanetScope fournissent une résolution temporelle améliorée (1 jour de revisite), une résolution spatiale améliorée (3 mètres dans le NIR), mais au détriment de la résolution spectrale (7 bandes visibles, et seulement une bande s'étendant légèrement dans le domaine IR). Ce compromis est cependant bénéfique dans le cas d'une évolution rapide des coulées de lave et d'une faible couverture nuageuse, comme lors de cette éruption. A noter que cette technique permet de mettre en évidence la partie active de la coulée de lave, alors qu'une cartographie plus traditionnelle de la coulée de lave (par exemple en utilisant l'image RVB en fausses couleurs) reste possible en comparant visuellement les images acquises à différents passages, à condition qu'un contraste suffisant entre les deux soit obtenu.

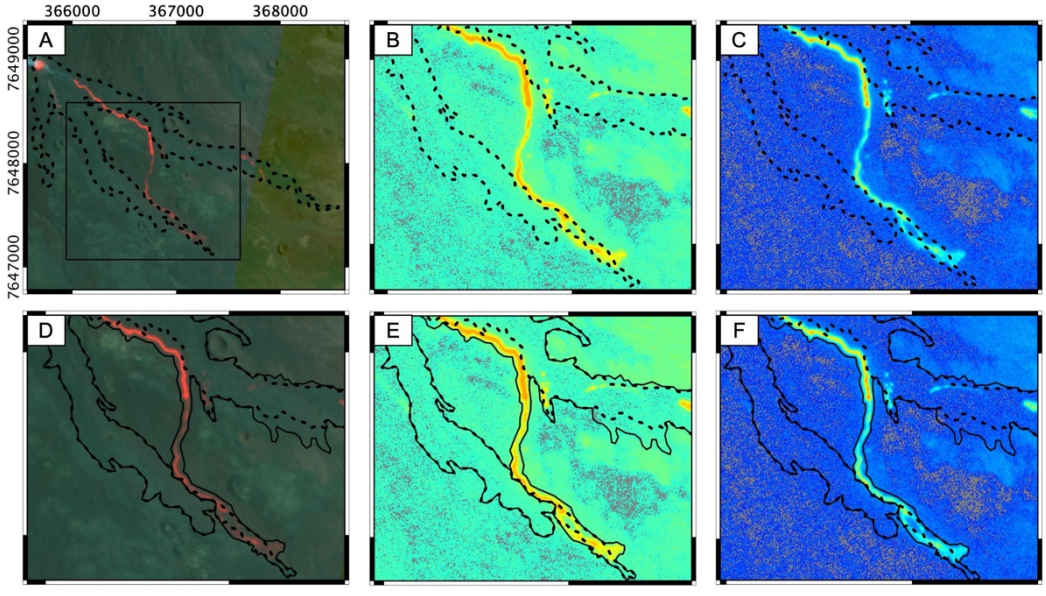


*Figure 54 : Exemple d'images Planetscope acquises le 2 octobre 2022 à 05h31 UTC en bandes RVB fausses couleurs (A, D), avec un indice de végétation par différence normalisé (NVDI) (B, E) et un indice de végétation triangulaire à bord rouge (RTVI) (C, F). La ligne pointillée représente le contour de la veille et la ligne noire continue (uniquement sur les images du bas) représente le contour actualisé de la coulée de lave qui a pu être obtenu à partir de cette acquisition. Le rectangle de l'image A délimite les images B, C, D, E, F.*

## > Le Multi-spectral

### Détection des panaches de $SO_2$

Les acquisitions du programme COPERNICUS développé par la Commission Européenne fournissent des images de l'instrument TROPOMI (installé sur le satellite Sentinel 5) destiné à l'observation de la composition de l'atmosphère, et notamment des concentrations en SO2. Ainsi les différentes images acquises lors de l'éruption du 19 septembre – 5 octobre 2022 ont permis d'estimer l'évolution de la teneur en SO2. La masse intégrée dans un rayon de 300 km ($283.10^3$ $km^2$) autour de la source

volcanique (produit TROPOMI 7 km, seuillé pour les valeurs > 0.3 DU – Dobson Unit) au cours du temps a évolué comme suit (Figure 55) :
2022-09-26 / 0.3 kton
2022-09-27 / 0.6 kton
2022-09-28 / 0.6 kton
2022-09-29 / 0.8 kton
2022-09-30 / 0.8 kton
2022-10-01 / 1.5 kton
2022-10-02 / 1.9 kton
2022-10-03 / 2.5 kton
2022-10-04 / 3.9 kton
2022-10-05 / 1.3 kton

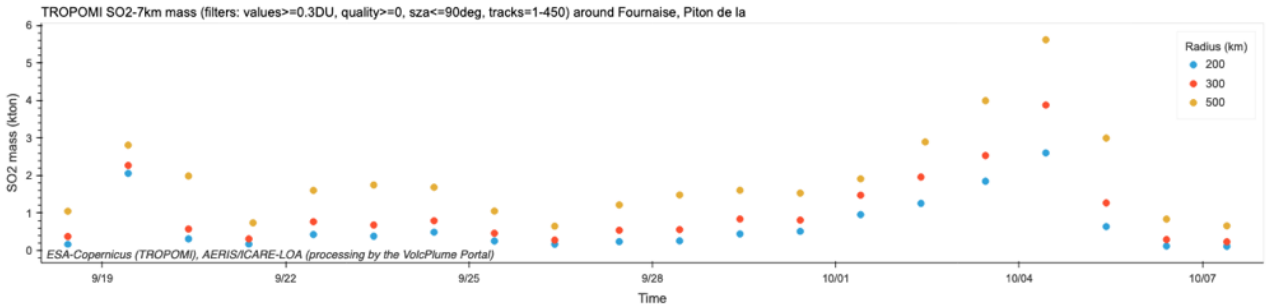


*Figure 55 : Évolution de la masse de SO2 (en kton) intégrée dans un rayon de 200 (bleu), 300 (rouge) et 500 (jaune) km entre le 19 septembre et le 7 octobre 2022 (à 7 km d'altitude) (©ESA-Copernicus (TROPOMI) ; GVO (volcanoes) ; AERIS/ICARE-LOA (VolcPlume portal) ; INERIE-LCSQA-ATMO France / GEOD'AIR ; IPGP).*

Il est à noter qu'au cours de l'éruption la couverture nuageuse était assez faible dans la zone sauf les 19 et 28 septembre. Il ressort de la Figure 55 que les valeurs massiques de $SO_2$ ont connu un maximum le 4 octobre puis ont chuté significativement le 5 octobre (date de la fin de l'activité éruptive en surface). Cependant des valeurs résiduelles ont été enregistrées après la fin de l'éruption liées à la durée de vie du $SO_2$ dans la troposphère, à la présence ou non de vent et la grande sensibilité de TROPOMI qui peut enregistrer des valeurs basses de $SO_2$ produit par d'autres sources.

A l'OVPF, nous traitons, analysons et archivons les données de trois capteurs spatiaux hyperspectraux en capacité de mesurer/modéliser les quantités de $SO_2$ présents dans l'atmosphère lors des éruptions du Piton de la Fournaise depuis 2004. Notre base de données remonte dans le temps jusqu'en septembre 2004 pour le capteur OMI présent sur le satellite AURA de la NASA, août 2015 pour le capteur OMPS sur NOAA-20 de la NOAA et février 2019 pour le capteur TROPOMI sur Sentinel-5 de l'ESA.
Les données archivées sont, maintenant, directement traitées par les algorithmes du GSFC de la NASA sur une fenêtre carrée de 5° de coté (soit $1{,}15.10^6$ km2) plus ou moins centrée sur La Réunion. Sur la Figure 56 il est notable que les données des trois capteurs montrent des tendances comparables même si TROPOMI est plus sensible que les deux autres. Il est également visible qu'un dégazage important a été observé en début d'éruption suivi d'une baisse significative. En fin d'éruption un pic de $SO_2$ est mesuré par les trois capteurs avec un maximum le 4 octobre de 2.996 KT pour OMI, 2.634 KT pour OMPS et 3.25 KT pour TROPOMI dans la zone d'intérêt étudiée. Pour OMI, comparée aux données enregistrées depuis 2004, cette mesure est la 23$^{ième}$ plus importante et la 11$^{ième}$ si l'on exclut l'éruption exceptionnelle d'avril 2007. Pour OMPS, la série de comparaison est plus réduite et le 4 octobre correspond à la 11$^{ième}$ mesure la plus importante. Enfin, pour TROPOMI il s'agit de la 3$^{ième}$ valeur la plus importante.

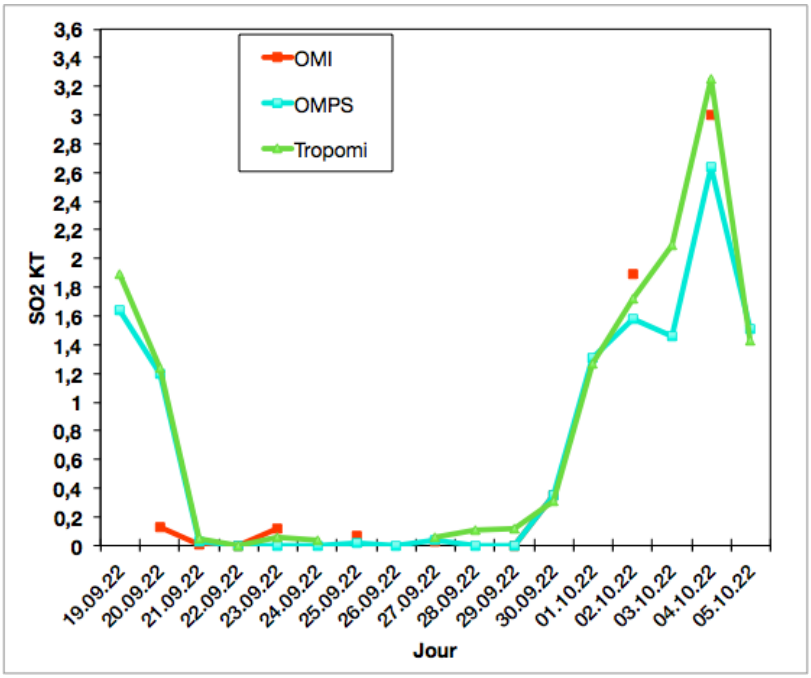


*Figure 56 : Évolution de la masse de $SO_2$ (en kton) intégrée dans une zone d'intérêt de 5°x 5° et mesurée par trois capteurs différents OMI, OMPS et TROPOMI.*

Ce schéma avec un maximum juste avant la fin de l'éruption n'est pas rare au Piton de La Fournaise. C'est également le cas pour les éruptions de février 2005, octobre 2005, août 2015, février 2019, février 2020, avril 2020 et décembre 2021.

**Quantification des flux de lave et calcul des volumes émis en surface**

Pour le suivi et la quantification des flux de lave et calcul des volumes émis en surface, l'OVPF se base sur deux plateformes : MIROVA (Université de terrain) et HOTVOLC (OPGC).

Le service **MIROVA**, géré par D. Coppola de l'Université de Turin, réalise depuis plusieurs années un suivi en routine, à partir d'images MODIS, des flux de lave à partir des propriétés spectrales (cf. exemple Figure 57 pour l'éruption du 22 septembre – 5 octobre 2022).

Accès MIROVA : https://www.mirovaweb.it/

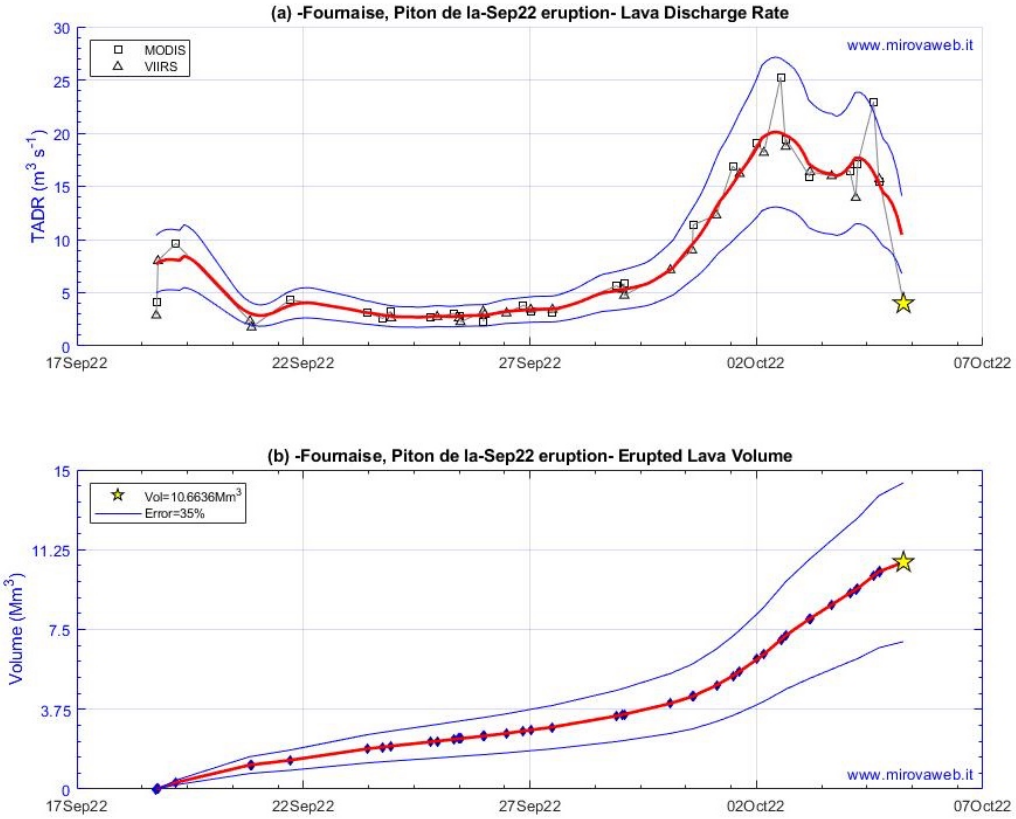


*Figure 57 : Évolution des débits (en haut) et du volume cumulé entre le 19 septembre et le 5 octobre 2022 estimés à partir des images satellites (©MIROVA, Université de Turin).*

L'OVPF se base également sur les données du service **HOTVOLC** (OPGC/SNOV/INSU).

HOTVOLC un système continu d'observation et d'alerte en temps-réel de l'activité éruptive (coulées de lave, panaches de cendres et de gaz) par télédétection spatiale infrarouge.
C'est un service labellisé par le CNRS-INSU depuis 2012, et intégré au Service National des Observations en Volcanologie (SNOV). Il relève de l'exercice de fonction officielle du Service de Météorologie Nationale (Météo-France) depuis 2018.
L'ensemble des données acquises pour les activités d'observation du Piton de la Fournaise proviennent du satellite géostationnaire Meteosat (HRIT - 0° service). Les produits (débits, cartes, etc.,) calculés par l'OPGC sont diffusés en libre accès sous la forme (i) d'images géolocalisées (geotiff) et de séries temporelles (csv) et mis à disposition de l'OVPF pour le suivi opérationnel des éruptions.

*Accès HOTVOLC :* https://hotvolc.opgc.fr/

Éruption du 19 septembre – 5 octobre 2022

La première anomalie thermique est détectée (via le produit : Lava hotspot / NTI*) le 19 septembre à 12h15 UTC avec une TSR (Total Spectral Radiance) de 2,3 W/m²/sr/µm, témoignant d'un niveau d'activité faible (code couleur : vert). La dernière acquisition survient le 04 octobre à 21h00 UTC, correspondant à une durée totale de 16 jours.

Le débit lavique initial, calculé en opérationnel, donne une valeur importante de 28 m³/s pendant une durée assez courte de 10 heures environ. Ensuite, les débits apparents chutent à des valeurs comprises entre 1-8 m³/s. A partir du 30 septembre, une

hausse importante et continue du débit lavique est constatée avec des valeurs comprises entre 10-20 m³/s, avant une chute brutale indiquant la fin de l'éruption le 05 octobre.

Les 16 jours d'acquisition représentent le traitement de 1536 images Meteosat (disque complet) dans 6 bandes spectrales différentes (IR). Les modèles opérationnels (i.e., automatisés) de calcul du débit peuvent être biaisés par différents processus tels que les conditions météorologiques, le passage de la coulée en tunnel de lave, ou en cas de lacune d'acquisition des images.

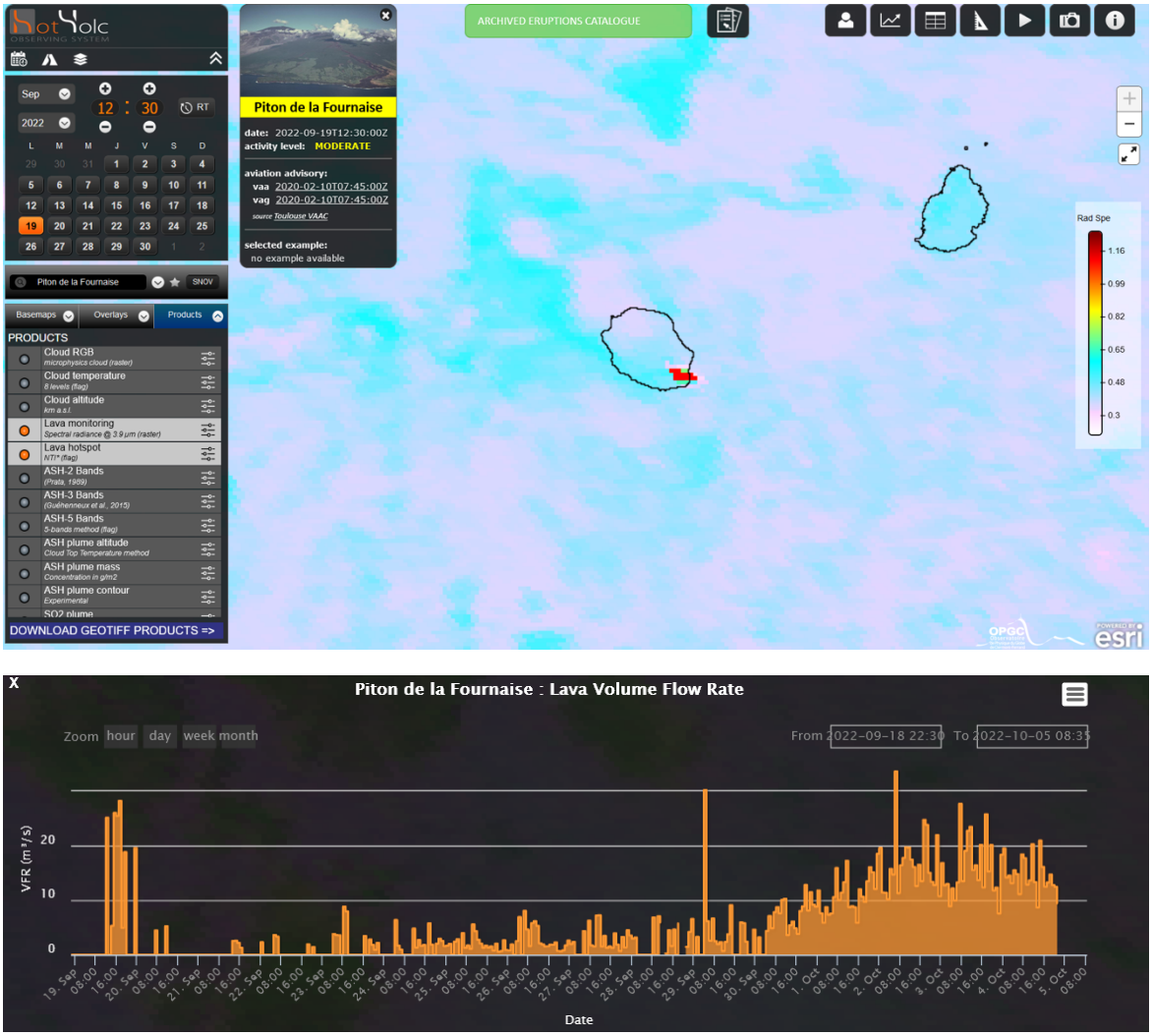


*Figure 58 : (haut) Copie-écran HOTVOLC de la première anomalie thermique (19/09/2022 – 12h30 UTC) des produits 'Lava monitoring' et 'Lava hotspot' témoignant de l'arrivée de lave en surface. (bas) Série temporelle du débit lavique 'Lava Volume Flow Rate' (VFR), indiquant l'évolution du débit au cours du temps.*

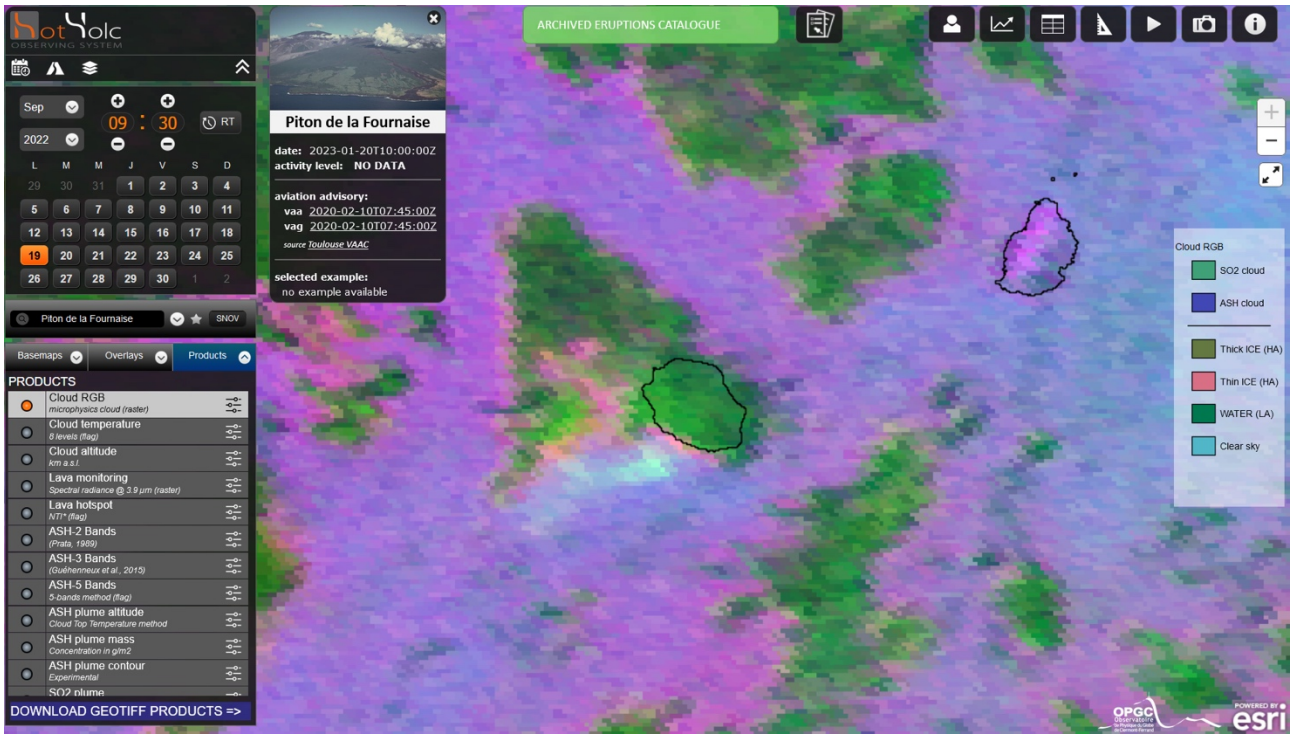


*Figure 59 : Panache de $SO_2$ visible (06h-10h le 19/09/2022) en vert-clair au sud-ouest de l'île de La Réunion peu de temps avant les premières détections laviques de surface.*

## > Simulation des coulées de lave au Piton de la Fournaise

**Anticipation et suivi des écoulements de lave**

Depuis 2018, à chaque éruption, l'étendue probable de la coulée de lave active est modélisée avec DOWNFLOWGO, la combinaison des modèles DOWNFLOW et FLOWGO (Harris et al. 2017, 2019, Chevrel et al., 2022). Une carte d'aléas est ainsi produite, représentant la distribution des trajectoires probables et la distance maximale que la coulée pourrait atteindre en fonction d'un débit volumétrique donné. La première carte est produite dès les premières heures de l'éruption puis mise en jour si besoin lorsque la position de l'évent change ou suivant la fluctuation du débit.
Lorsqu'un relevé du contour de lave est disponible (obtenu par satellite ou par photo aérienne, voir sections ci-dessus), ce contour est alors ajouté à la carte afin de valider la simulation et de suivre l'extension de la coulée tout au long de l'éruption.
Les cartes produites sont partagées dès leur production avec l'État-Major de Zone et de Protection Civile de l'Océan Indien (EMZPCOI).

**Suivi de l'éruption du 19 septembre - 5 octobre 2022**

Du fait de mauvaises conditions météorologiques une localisation précise de l'évent n'a pas été possible dans les premières heures de l'éruption. La première simulation a donc été faite à partir d'une position géographique approximative de l'évent et a été délivrée à l'EMZPCOI vers 12h00 heure locale (environ 4h après le début de l'éruption, la modélisation ayant été réalisée depuis la métropole ; Figure 60). Malgré l'approximation de la position, cette carte a tout de même servi à l'OVPF et à l'EMZPCOI d'écarter un scenario où la lave atteignait la RN2, à moins qu'un débit de lave extrême ne se produise, et donc d'écarter ainsi une menace importante immédiate pour la route nationale. De plus la carte a permis d'identifier rapidement les secteurs potentiellement menacés par un incendie en cas de contact de la lave avec le rempart de l'Enclos Fouqué. Les débits obtenus dans les premières heures étaient de 20-30$m^3$/s (cf. section précédente), écartant ainsi un scénario de contact rapide de la lave avec le rempart.

Une mise à jour de la simulation a été faite à 16h30 heure locale, lorsque la position de l'évent a été connue avec précision (survol hélicoptère ; Figure 61). Cette nouvelle simulation suggérait cette fois un débit de 50 $m^3/s$ pour que la coulée puisse atteindre le rempart (flèches bleues, Figure 61).

Une station de surveillance de l'OVPF (FOR), s'est retrouvée menacée par la coulée de lave et a été retirée en prévention lorsque la lave se trouvait à moins de 50 m de la station.

Au cours des jours suivants, les données satellites ont permis de suivre l'évolution de l'avancé de la coulée (contour de la coulée, Figure 50, et débit d'émission de lave en surface, Figure 55) et de la comparer aux simulations.
La comparaison avec les simulations a montré que la trajectoire simulée de la coulée de lave ne représentait pas bien la coulée réelle. Le bras de coulée se dirigeant vers le sud-est n'était pas bien modélisé et la trajectoire principale se situait plus au sud que la réalité (Figure 62).
Avec une mise à jour de la topographie, prenant en considération l'éruption de décembre 2021, les simulations étaient plus en accord avec la réalité (Figure 63). Nous soulignons ici une fois de plus l'importance de mettre à jour la topographie après chaque éruption du fait de sa grande influence sur l'écoulement lavique.

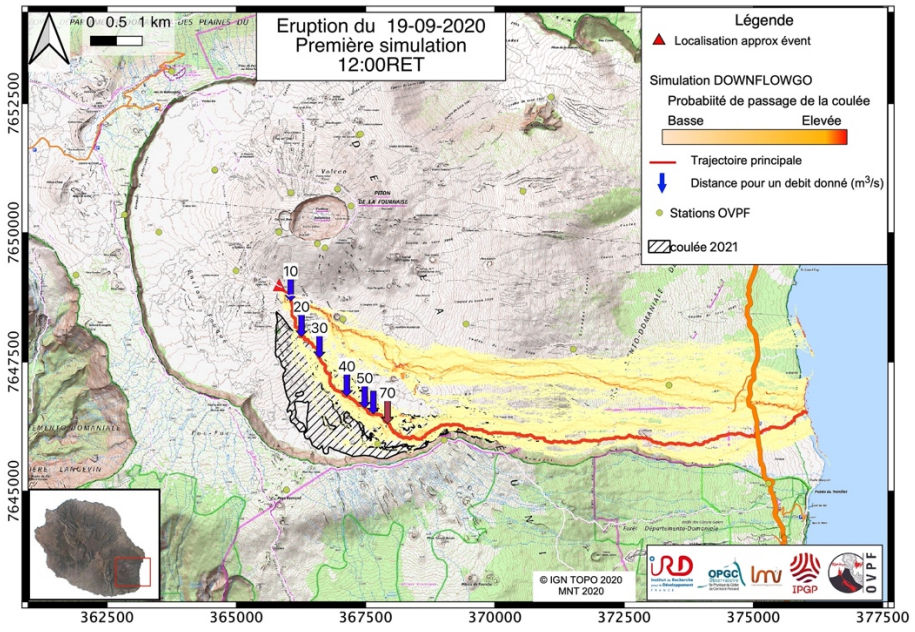


*Figure 60 : Première carte de simulation de l'écoulement de lave produite à partir de la position approximative de l'évent environ 4h après le début de l'éruption sur un MNT de 2020.*

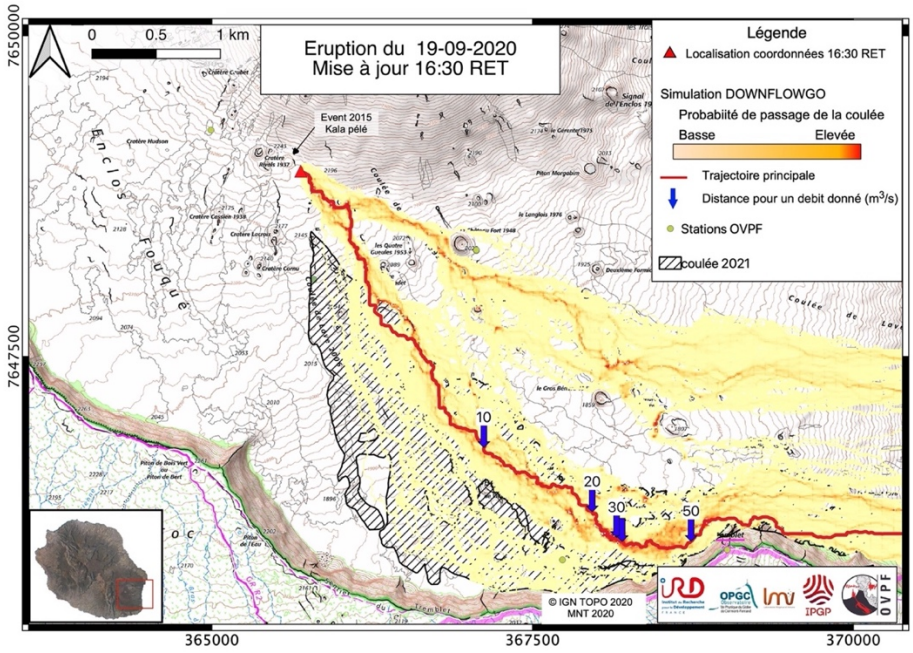


*Figure 61 : Mise à jour de la simulation de l'écoulement de lave avec la localisation précise de l'évent environ 8h après le début de l'éruption sur un MNT de 2020.*

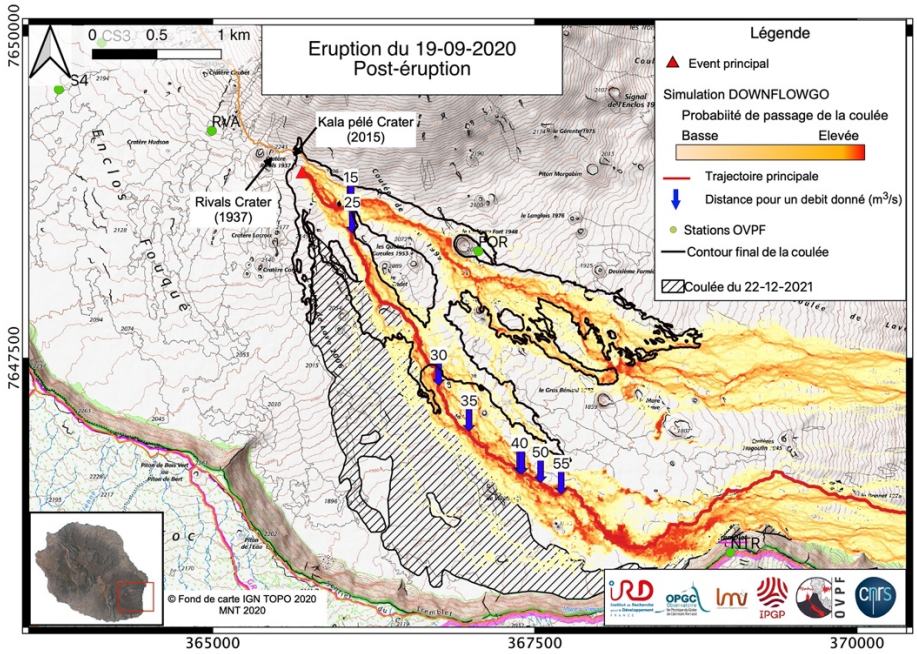


*Figure 62 : Carte de simulation de l'écoulement de lave produite après la fin de l'éruption qui montre le désaccord entre réalité et simulation. Ceci est dû à une topographie qui ne prend pas en compte la précédente éruption de 2021 (en haché).*

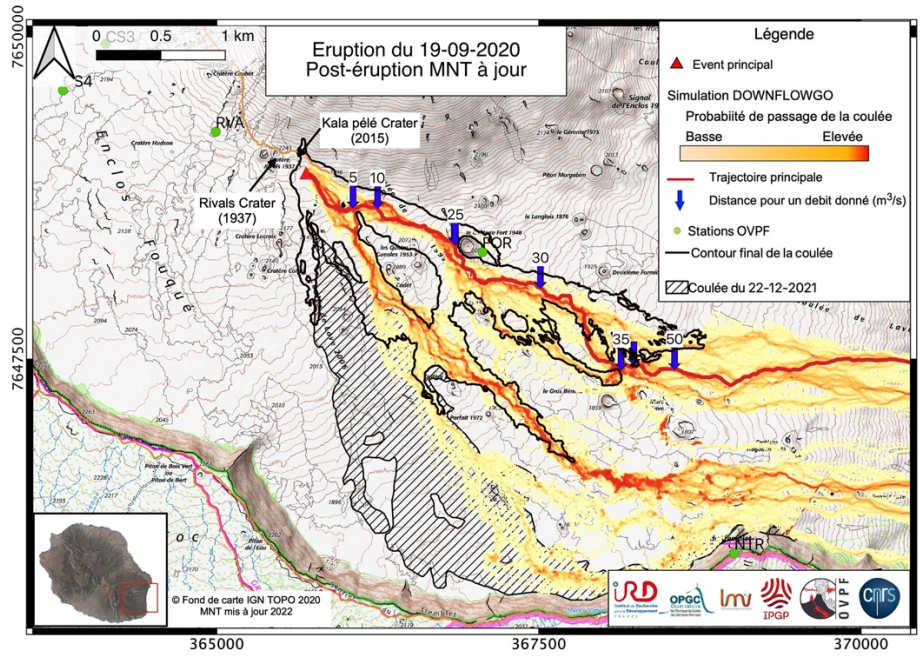


*Figure 63 : Carte de simulation de l'écoulement de lave produite après la fin de l'éruption avec la topographie mise à jour.*

Valorisation

- Collaborations au niveau national et international bien établies pour une réponse efficace aux éruptions du Piton de la Fournaise et applicable à tout volcan.
- Les cartes produites cette année ont toutes été utilisées pour les gestions de crises éruptives par l'OVPF et l'EMZCOI.
- un article a été publié sur ces modélisations : *Chevrel MO, Harris A, Peltier A, Villeneuve N, Coppola D, Gouhier M, Drenne S. (2022) Volcanic crisis management supported by near real time lava flow hazard assessment at Piton de la Fournaise, Volcanica 5(2), pp. 313–334. https://doi.org/10.30909/vol.05.02.313334*

***Références :***

*Chen, P.-F., T. Nicolas, JH. Wang, V. Philippe, WJ. Huang, BG. Li (2010), New index for crop canopy fresh biomass estimation, Guang pu xue yu guang pu fen xi = Guang pu, 30(2), 512–517.*

*Derrien, A. (2019), Apports des techniques photogrammétriques à l'étude du dynamisme des structures volcaniques du piton de la fournaise [Université de Paris], http://www.theses.fr/2019UNIP7084.*

*Derrien, A., N. Villeneuve, A. Peltier, L. Michon (2018), Multi-temporal airborne structure-from-motion on caldera rim: Hazard, visitor exposure and origins of instabilities at Piton de la Fournaise, Progress in Physical Geography: Earth and Environment, 43(2), 193–214. https://doi.org/10.1177/0309133318808201.*

*Harris, A., N. Villeneuve, A. Di Muro, V. Ferrazzini, A. Peltier,, D. Coppola, M. Favalli, P. Bachèlery, JL. Froger, L. Gurioli, S. Moune, B. Galle, S. Arellano (2017), Effusive Crises at Piton de la Fournaise 2014-2015: A Review of a Multi-National Response Model. Jounal of Applied Volcanology. 6 :11, DOI 10.1186/s13617-017-0062-9*

*Harris, A., M.O. Chevrel, D. Coppola, M.S. Ramsey, A. Hrysiewicz, S. Thivet, N. Villeneuve, M. Favalli, A. Peltier, P. Kowalski, A. Di Muro, JL. Froger, L. Gurioli (2019), Validation of an integrated satellite-data-driven response to an effusive crisis: the April–May 2018 eruption of Piton de la Fournaise. Annals of Geophysics, [S.l.], v. 61, p. AC48, jan. 2019. ISSN 2037-416X. doi: https://doi.org/10.4401/ag-7972.*

*Plank, S., F. Marchese, C. Filizzola, N. Pergola, M. Neri, M. Nolde, S. Martinis (2019), The July/August 2019 Lava Flows at the Sciara del Fuoco, Stromboli–Analysis from Multi-Sensor Infrared Satellite Imagery, In Remote Sensing (Vol. 11, Issue 23). https://doi.org/10.3390/rs11232879*

*Rouse, J. W., RH. Hass, JA. Schell, DW. Deering, JC. Harlan (1974), Monitoring the vernal advancement and retrogradation (green wave effect) of natural vegetation, Final Report, RSC 1978-4, Texas A & M University, College Station, Texas, 1–120.*

*Tu, Y.-H., K. Johansen, B. Aragon, MM. El Hajj, MF. McCabe (2022), The radiometric accuracy of the 8-band multi-spectral surface reflectance from the planet SuperDove constellation, International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 114, 103035. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jag.2022.103035*

## 8. Réalisations techniques et informatiques

Éléments dont l'équipe technique a la charge et la responsabilité :

- Maintenance du réseau de surveillance et des ressources informatiques de l'OVPF 24h/24, 365j/an du Piton de la Fournaise et des stations REVOSIMA dont elle a la charge : ces opérations peuvent se faire in situ ou à distance. Cela concerne 108 capteurs et 77 infrastructures pour La Réunion, et 11 capteurs et 7 sites pour le REVOSIMA, avec également la préparation des OBS (sismomètres fond de mer) et les missions en mer pour les déployer.

- Développer le réseau de surveillance et les moyens informatiques du Piton de la Fournaise et du REVOSIMA : étude, conception, réalisation et installation des nouvelles stations, et démontage des stations ne répondant plus aux exigences scientifiques ; étude et développement des solutions informatiques sur les serveurs.

- Développement et conception technologiques des stations des réseaux de surveillance du Piton de la Fournaise et du REVOSIMA pour les rendre plus fiables et plus robustes.

- Installation et maintenance de la solution de transmission et des services informatiques associés de deux stations sismiques du LGSR (Laboratoire Géosciences Réunion, Université de La Réunion, cf. section 4).

- Conception de solutions instrumentales novatrices pour répondre à des besoins scientifiques spécifiques de l'OVPF (projets Inclinomètres, GETS et RTK).

- Implication dans l'installation et la calibration hebdomadaire de l'observatoire magnétique de La Réunion du réseau d'observatoires magnétiques de l'IPGP (cf. section 12).

- Implication dans les projets de recherches portés par l'équipe scientifique de l'OVPF : projet HATARI (cf. section 9) - études, conception, réalisation et installation des stations ; projet DAS (cf. section 9) - études, conception et réalisation d'une solution de fourniture d'énergie, de transmission des données et d'installation de la fibre.

- Implication dans les projets à la frontière de la recherche et de la surveillance à Mayotte : étude, conception, réalisation et installation d'une plateforme multicapteurs sur lac Dziani à Petite Terre ; mise en place des solutions de stockage et de synchronisation des données (cf. section 11).

- Soutien aux projets de recherche externes à l'OVPF/IPGP avec dans la plupart des cas la prise en charge totale de l'étude, conception, réalisation et installation des stations (projets BlueSeis et Magnéto-tellurique, cf. section 9) et des moyens de stockage et/ou des solutions informatiques sur les serveurs.

- La partie atterrage du projet MARMOR (cf. section 11) avec la participation à la rédaction des cahiers des charges et à terme son exploitation, sa maintenance et son développement aussi bien pour la partie matérielle et que l'interfaçage IHM et la surveillance de l'observatoire fibré.

- Soutien technique pour la maintenance du réseau de surveillance du Karthala aux Comores et de son observatoire OVK (cf. section 9).

- Comme l'ensemble du personnel de l'OVPF, participation aux astreintes pour la surveillance du Piton de la Fournaise et du REVOSIMA 24h/24 et 365j/an, et également aux astreintes renforcées lors des éruptions. Localisation des séismes du REVOSIMA pour certains personnels.

Certains objectifs des années précédentes n'ont pas pu être assurés en 2022, notamment l'installation de nouvelles stations, des modernisations ou des opérations de maintenance de stations, et la conception instrumentale. Plusieurs raisons à cela : le nombre croissant de projets dans lequel est impliqué l'OVPF sans augmentation d'effectif, les difficultés d'approvisionnement des équipements dans un contexte post-COVID mondial, des conditions météorologiques qui ont empêché les missions héliportées dans certains secteurs de l'île.

## > Réalisations techniques

** les réalisations techniques effectuées dans le cadre du REVOSIMA sont présentées dans la section 11.*

**Réseau de surveillance du Piton de la Fournaise**

Le réseau de surveillance de l'OVPF se compose d'une centaine de capteurs (Figures 64, 65, 66) répartis sur 69 sites sur lesquels les différentes disciplines et expertises scientifiques peuvent s'appuyer. Le nombre de capteurs et de sites sont stables (2021 : 108 capteurs, 69 sites). A ces 69 sites se rajoutent 8 sites occupés par des relais de transmission.

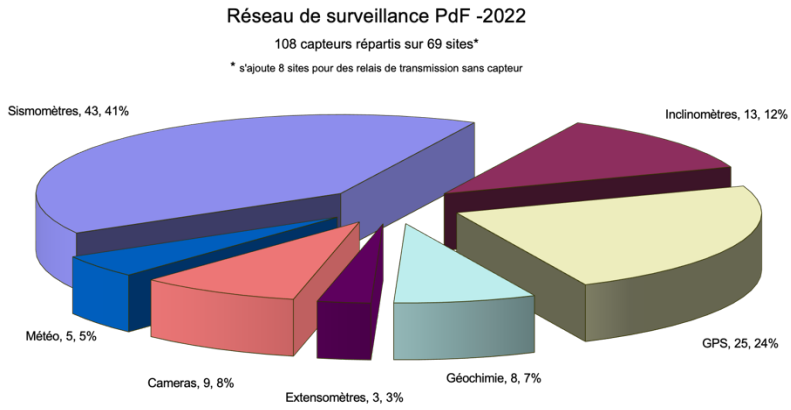


*Figure 64 : Répartition des capteurs du réseau de surveillance de l'OVPF en 2022 (capteur, quantité, %).*

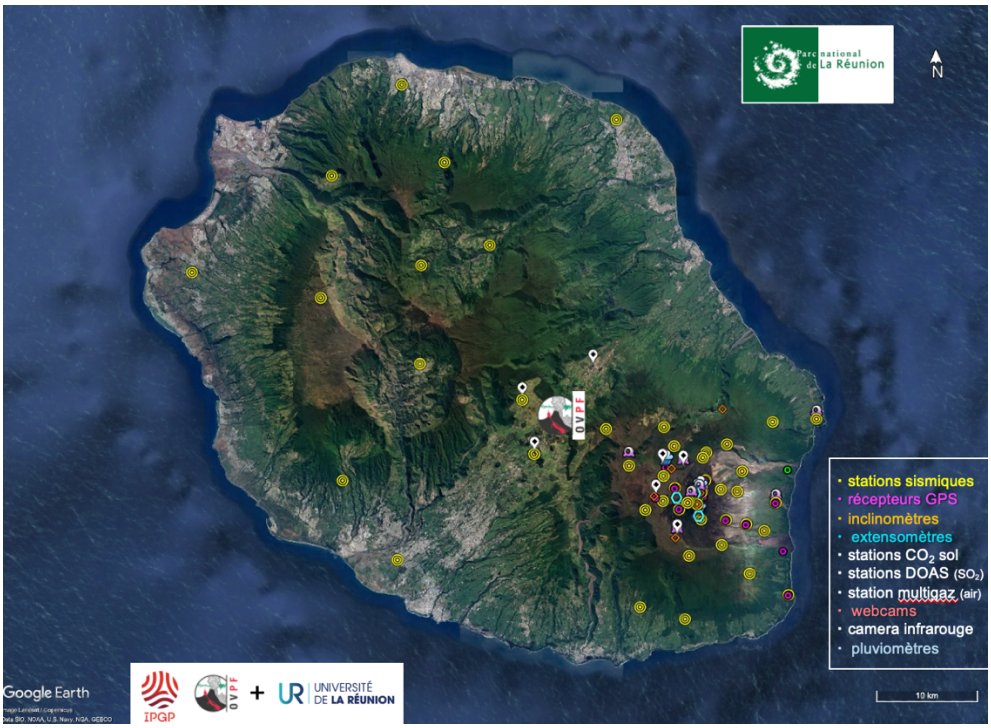


*Figure 65 : Carte du réseau de surveillance de l'OVPF en 2022.*

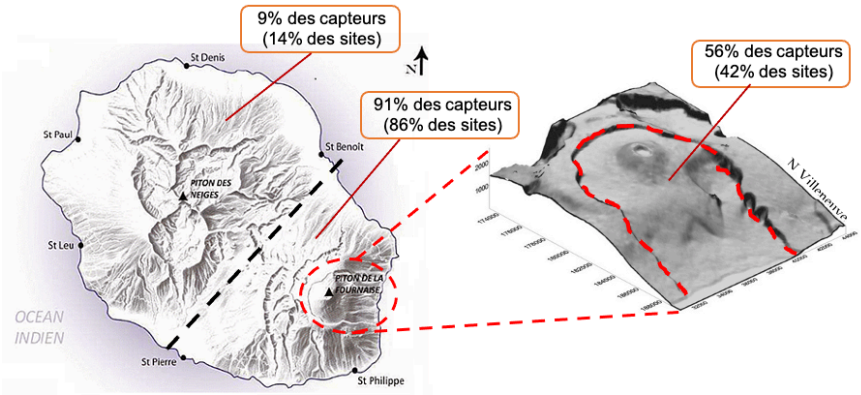


*Figure 66 : Répartition géographique des capteurs du réseau de surveillance de l'OVPF en 2022. L'Enclos Fouqué, les Grandes Pentes et le Grand Brûlé concentrent 56% des capteurs (~ 1 capteur/2km² et 1 site/3km²) ; et le massif du Piton de la Fournaise, 91% des capteurs.*

Ce réseau dense nécessite une maintenance et un développement permanent pour le rendre performant, robuste et pérenne. Une évolution constante du matériel, des infrastructures et du savoir-faire, associée à de nombreuses interventions in situ et à distance (Figure 67), permet d'assurer des conditions opérationnelles 24h/24 et 365j/an du réseau de surveillance, et de transmettre les données de 99% des capteurs en temps réel.

Avec la mise en place d'équipements réseaux qui permettent d'une part d'affiner les diagnostics de panne et d'autre part d'effectuer des "réparations" ou des contrôles à distance, les interventions in situ sont mieux ciblées, plus efficaces et moins nombreuses.

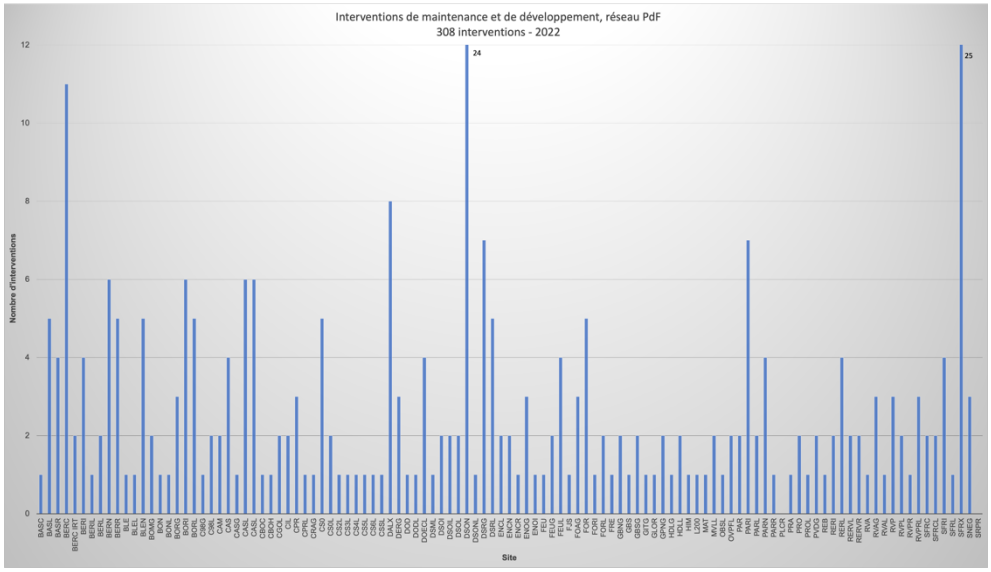


*Figure 67 : (en haut) Nombre d'interventions de maintenance et de développement sur les différentes stations du réseau Piton de la Fournaise au cours de l'année 2022.*

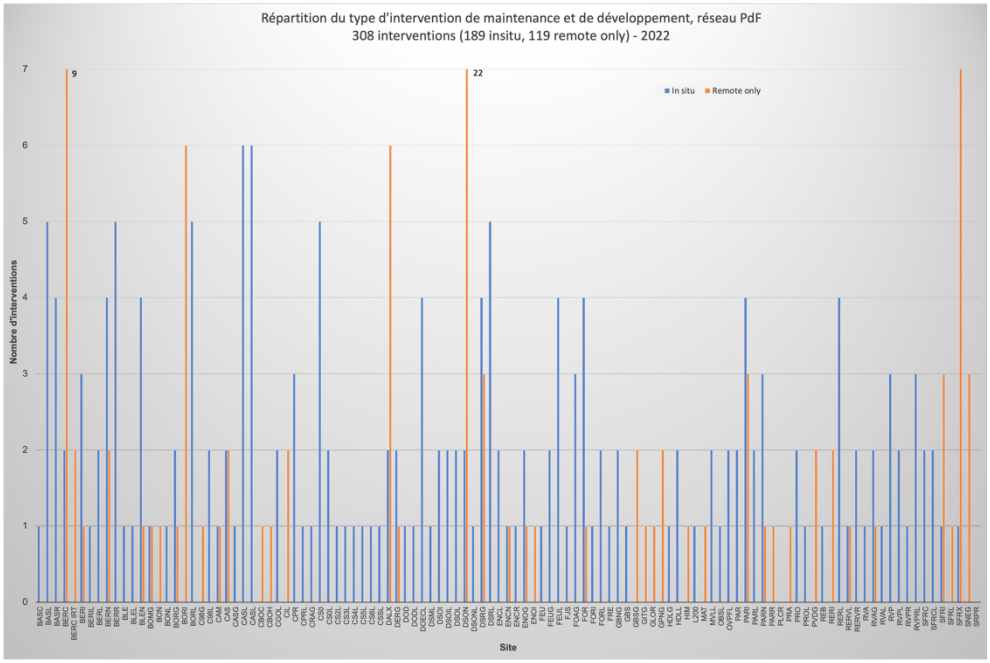


*Figure 67 (suite) : (en bas) répartition entre interventions in situ (en bleu) et à distance (remote only ; en orange) sur les différentes stations.*

Les interventions se font donc également par télémaintenance, c'est-à-dire à distance depuis l'observatoire. Le module de WebObs (portail web de l'OVPF, cf. section « Réalisations informatiques » à la suite) mis en place en 2020 permet d'évaluer le volume de ce type d'intervention avec en plus la catégorie de l'intervention (capteur, transmission, énergie, infrastructure, …). Ces interventions à distance représentent 38,6% (119 interventions) du total des interventions (contre 18,6% en 2021). Cette évolution est à relativiser dans la mesure où la saisie des interventions à distance dans WebObs n'était pas pleinement opérationnelle en 2021.

La saisie systématique des interventions à distance et in situ sur les stations permet, grâce à la plateforme WebObs, de qualifier les réparations qui ont été réalisées. Ainsi les stations BERC caméra (Piton de Bert), DSON géochimie (Dolomieu Sud) et SFRX extensométrique (Soufrière) ont nécessité respectivement 11, 24 et 25 interventions pour les maintenir à l'état opérationnel (Figure 67). Ces 3 stations représentent 21,4% des interventions sur le réseau de surveillance. Cependant, avec les outils de diagnostic à distance et de télémaintenance, il n'y a eu que 3 interventions maximum in situ pour ces stations. Ainsi environ 90% de la remise en service des stations ont pu se faire à distance.

Le bénéfice obtenu est multiple. Moins de perte de temps pour l'équipe, sachant qu'une intervention in situ mobilise 2 personnels minimum sur une journée en moyenne, sans compter les délais d'intervention pour diverses raisons (disponibilité, météo, …) et la mobilisation d'un véhicule (dépense de carburant, usure du véhicule et pollution). Dès la connaissance de la panne, la station est remise en service très rapidement à distance avec une optimisation de la continuité des données.

Sur certaines stations, la conception par l'équipe technique de l'OVPF de cartes électroniques dédiées à l'instrumentation géophysique (inclinométrie et extensométrie de surface) permet d'avoir une maîtrise globale de toute la chaine instrumentale : dans un contexte de matériel industriel rapidement obsolète, une pérennité des éléments hardware et software est ainsi assurée.

Le nombre d'intervention (Figure 68) est en hausse par rapport à l'année 2021 avec une augmentation de 7,3% pour un nombre de capteurs stable pour le réseau de surveillance. A noter que les interventions à distance, maintenant systématiquement répertoriées, représentent environ 39% des interventions.

Le parc de capteurs, des équipements associés et des moyens de transmission n'est pas homogène, que ce soit par choix scientifique, technique ou budgétaire (Figure 69).

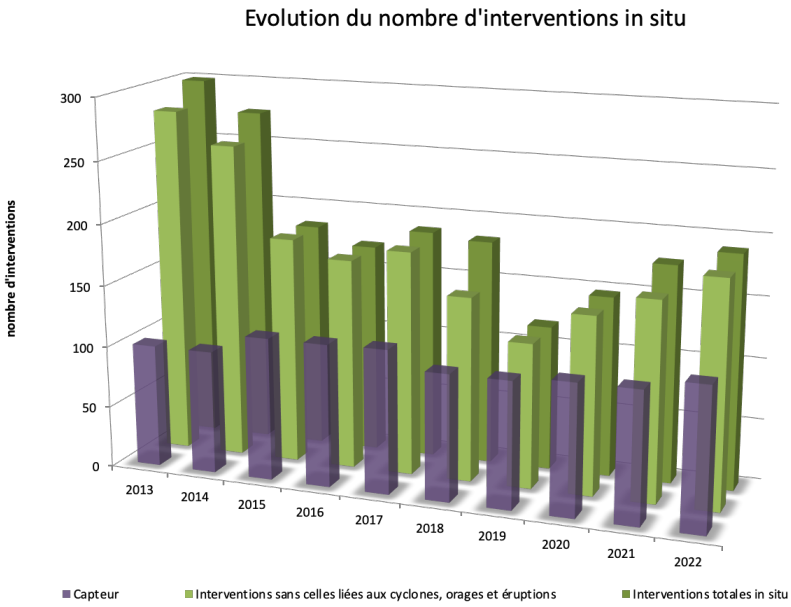


*Figure 68 : Évolution du nombre d'interventions sur le réseau de surveillance de 2013 à 2022 avec un nombre total de capteurs relativement stable (14 capteurs supplémentaires entre 2015 et 2018 issus de l'ERC Slidequakes et 8 capteurs supplémentaires en 2022 issus du projet de recherche BlueSeis). La maîtrise des interventions reflète les améliorations réalisées sur les infrastructures (structure des stations, gestion de l'énergie, protections foudre), la robustesse du matériel (capteurs, transmission) et la supervision du réseau par l'équipe technique de l'OVPF. A ces interventions viennent s'ajouter les mesures ponctuelles de terrain (géodésie et échantillonnages lors des éruptions) et les interventions de télémaintenance non répertoriées pour les années antérieures à 2021.*

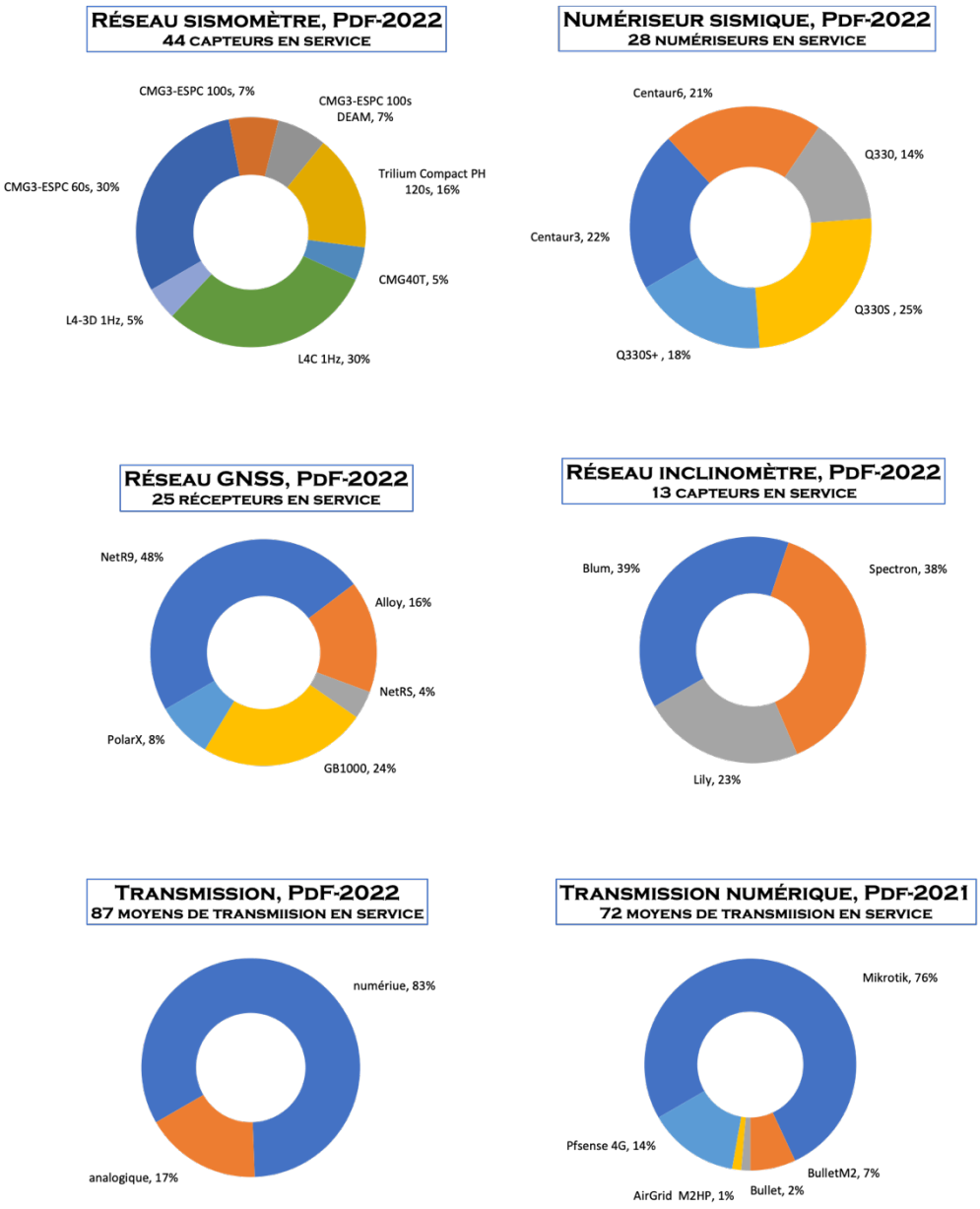


*Figure 69 : Répartition des équipements géophysiques des réseaux sismique, géodésique et des moyens de transmission (équipement, %).*

Ci-dessous les principales pannes suivants les réseaux considérés (nombre d'interventions, %). A noter qu'à chaque installation ou démontage complet d'une station ou un remplacement d'équipement (batterie, antenne, électronique, …) tous les déchets sont évacués et suivent une filière agréée pour leur recyclage et leur traitement suivant la règlementation en vigueur.

*Sismologie*

Interventions : 38, 12.3%

Afin de permettre la transmission de données en temps réel de la station RVP (Rivière des Pluies, St Denis, Figure 70), station sous la responsabilité du LGSR, l'OVPF a installé une solution de transmission des données en temps réel (relais autonome, numérique hertzienne et 4G). La maintenance de la transmission est assurée par l'OVPF.

*Figure 70 : A gauche le relais de transmission RVPR et à droite la station sismique RVP de la Rivière des Pluies.*

- CAM (Collège de Cambuston, St André) : remplacement du GPS du numériseur
- CAS (Piton des Cascades, Piton Ste Rose) : remplacement du GPS du numériseur
- CPR (Camp Pierrot, Salazie) : module 4G remplacé et reset du limiteur de décharge suite aux orages
- FOR (Château Fort, Enclos) : remplacement du Pcfox par un OrangePi
- RVA (Rivals, Enclos) : remplacement du GPS du numériseur
- RVP (Rivière des Pluies, St Denis) : plusieurs pannes sur la transmission numérique hertzienne et après l'installation

Remplacement des transmissions analogiques des stations courte période : voir section Transmission ci-dessous.

Complétude des données sismiques avec la récupération des données non télétransmises (transmission en panne, …) pendant l'année, et nettoyage des espaces de stockage des numériseurs pour éviter la saturation et la perte de données.

Mise à jour des dataless (fichiers décrivant les caractéristiques des instruments permettant de corriger les signaux de la réponse instrumentale) des stations sismiques suivants les modifications et la création des stations.

Ces trois points sont également réalisés pour les stations à terre du réseau de Mayotte, REVOSIMA.

*Géodésie*

Interventions : 42, 13.6%

Plusieurs réglages nécessaires (tension de coupure et/ou paramètre masque de hauteur) sur les récepteurs NetR9 pour les stations suivantes :

- BOMG (Bory Nord, Sommet)
- BORG (Cabane Bory, Sommet)
- CRAG (Piton de Crac, Grande Pente)
- DERG (Dolomieu Est, Sommet)

- DSRG (Dolomieu Sud, Sommet)
- CASG (Piton des Cascades, Piton Ste Rose)
- ENOG (Enclos Ouest, Enclos)
- GBNG (Grand Brûlé Nord, Grand Brûlé)
- GBSG (Grand Brulé Sud, Grand Brûlé)
- GPNG (Grande Pente Nord)
- GITG (Gite, Plaine des Sables)
- PVDG (Piton Parvedi, Enclos)
- SNEG (Soufrière Nord Est, Sommet)

Et d'autres interventions plus spécifiques :

- DSRG (Dolomieu Sud, sommet) : remplacement du NetR9 par un NetR9
- ENOG (Enclos Ouest, enclos) : câblage pour le pilotage distant de l'alimentation
- FEUG (Phare de St Philippe, St Philippe) : remplacement du récepteur NetR9 par un NetR9
- FOAG (Château Fort, enclos) : remplacement du récepteur GB1000 par NetR9 vieillissant
- HDLG (Hubert de Lisle, Grand Brûlé) : remplacement du récepteur GB1000 par un Polarx5

Il reste 6 récepteurs Topcon GB1000 obsolètes à remplacer. A noter que certains récepteurs Trimble NetR9 sont vieillissants (firmware et constellations) et qu'il faudra envisager de les remplacer progressivement.

*Inclinométrie et extensométrie*

Interventions : 27, 8.8%

Sur les 3 stations inclinométriques de forage, 1 seule est opérationnelle (PARI). L'inclinomètre de ENCI a été remonté en surface il y a quelques années pour plusieurs opérations de maintenance. Le délai d'approvisionnement d'un connecteur a retardé la remise en place du capteur in situ. Entre temps l'inclinomètre de la station BERI est tombé en panne et il a été décidé de le remplacer par celui d'ENCI. Cependant, les tentatives de remonté à la surface du capteur de BERI ont été vaines. D'autres essais seront nécessaires en 2023 avec du matériel adapté.

Plusieurs interventions sur la station PARI pour des problèmes de mise à l'heure de l'ordinateur embarqué et pour une détérioration de la station (transmission et câbles) par une vache probablement.

Plusieurs interventions à distance sur la station BORI (Bory, sommet) et SFRI (Soufrière, sommet) pour une relance du système d'acquisition.

Suite au cyclone au début de l'année 2022 (cf. section à la suite pour plus de détails), la station DSOI (Dolomieu Sud-Ouest, sommet) a été complétement détruite (sauf les capteurs Blum et Spectron) : installation d'une nouvelle infrastructure entièrement équipée (panneaux solaires, batteries, acquisition et gestion de l'énergie).

Après contrôle, il a été constaté que les inclinomètres de Blum de la station FORI (Château Fort, Enclos) sont hors services (oxydation sur la cellule photosensible).

Le développement et les tests pour la production de données miniSEED avec notamment la conversion à l'OVPF du flux ASCII en miniSEED par Seiscomp (logiciel de sismologie pour l'acquisition, le traitement, la distribution et l'analyse interactive de données) sont en cours.

*Géochimie*

Interventions : 42, 13.6%

- BERN (Station Novac $SO_2$, Piton de Bert) et PARN (station Novac $SO_2$, Piton Partage)

Maintenance et reconditionnement de la station dans un coffret étanche pour plus de robustesse.

- BLEN (Station Novac $SO_2$, Piton Bleu)

Remplacement des ailettes de l'anémomètre et télémaintenance. Mise en d'un module MPPT.

- DSON (Dolomieu Sud-Ouest, station multigaz au sommet)

Plusieurs redémarrages gérés à distance.

*Caméras*

Interventions : 17, 5.5%

Essentiellement des redémarrages à distance des différentes caméras. La caméra 4K de BASC (Piton des Basaltes) a été remplacée suite à une surtension.

*Transmission*

Interventions : 33, 10.7%

La transmission des données est un élément majeur pour permettre une analyse en temps réel des phénomènes volcaniques. C'est pourquoi nous y apportons une attention toute particulière.

Pour répondre aux directives de l'Agence Nationale des Fréquences ANFR, une refonte des fréquences de transmission analogique des 13 stations sismologiques courtes périodes (nouvelles fréquences ANFR) est en cours de réalisation. Au total, en comptant les relais, 22 sites sont concernés. Le nouveau matériel a été testé et installé sur plusieurs stations et relais (Figures 71 et 72). En 2022, la station BLE (Piton Bleu) a été upgradée. A noter que la station TEO (Theophane Begue, Saint Joseph) sera modernisée avec un sismomètre 3 composantes et une transmission numérique. Elle n'est donc plus concernée par la mise à jour analogique.

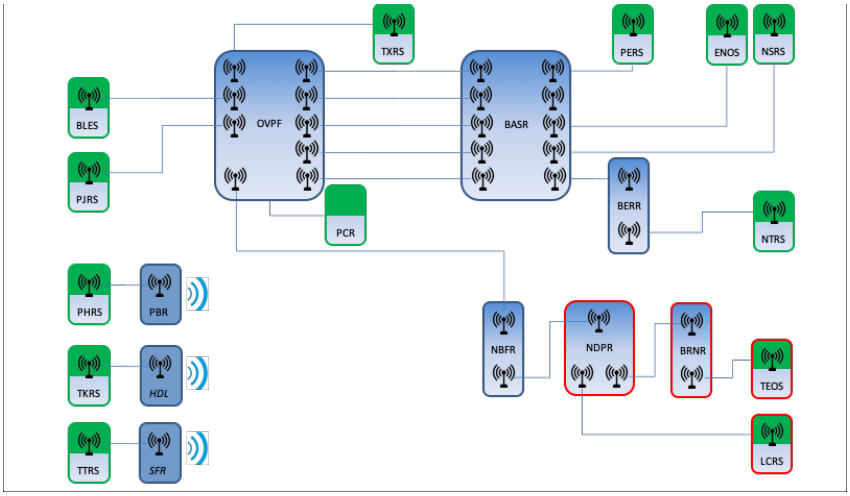


*Figure 71 : Transmissions analogiques des sismomètres courte période (stations et relais). Les éléments encadrés en rouge correspondent aux stations et relais dont les équipements et/ou les fréquences de transmission restent à remplacer (20222 : BLE nouveau matériel en place et fréquence à modifiée, suppression de RERS et TTRS relayée par SFR).*

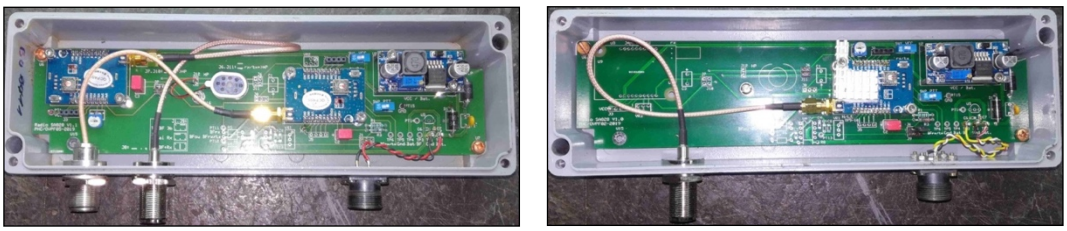

*Figure 72 : Nouveaux équipements de transmission analogique. En haut pour un relais (réception/émission), en bas pour une station (émission).*

La migration du matériel de transmission numérique vers des équipements plus performant (Mikrotik) continue avec pour l'année 2022 les stations DOE (Dolomieu Est, sommet), RVP (Rivière des Pluies) et SFRC (Soufrière, sommet). Ils restent quelques équipements de transmission qui ne seront pas remplacés par des Mikrotik pour différentes raisons. De plus, ces équipements sont systématiquement installés avec du matériel permettant de réaliser des opérations de télémaintenance (carte relais et/ou port debug) diminuant ainsi les interventions sur site et la perte de données. Pour les nouvelles infrastructures de TKR et de CFN qui seront installées courant 2023, la transmission numérique hertzienne sera redondée par la 4G : un développement sur les aspects de sécurité a été nécessaires afin de répondre aux normes en vigueurs.

Concernant la communication des équipes de terrain entre elles et avec l'observatoire, de nouveaux relais de transmission phoniques ont été mis en place sur le terrain. Cependant la configuration de ces derniers doit être revue en profondeur pour assurer leur bon fonctionnement (démontage).

Remplacement d'équipement (routeur, antenne, …) et résolution de panne à distance (reboot et reconfiguration).

*Infrastructure et énergie*

Interventions : 58, 18.8%

Quelques réparations dues aux cyclones du début de l'année 2022 (cf. section à la suite pour plus de détails), entretien de peinture des parties métalliques et réfection.

- Installation de 9 stations : DSOI (Dolomieu Sud-Ouest, sommet) et les stations du projet BlueSeis (voir section 9).

Sur le relais de BASR (Piton des Basaltes), une réfection des équipements a commencé en 2022 : remplacement des 2 jeux de batteries (12 éléments de 2V), du bac, évacuation des vieilles batteries, du groupe électrogène et de la cuve à gasoil par héliportage financé par le Parc National de La Réunion.

A terme l'infrastructure gérant l'énergie du relais BASR sera complètement modernisée avec un nouveau groupe électrogène, des nouveaux modules pour gérer l'énergie, l'agrandissement de la ferme solaire et l'augmentation de la capacité batterie. La partie acquisition et transmission sera également réorganisée.

Ces travaux permettront d'une part de pérenniser ce relais qui est essentiel pour la transmission des données des stations situées sur la partie Ouest du volcan, et d'autre part d'assurer la production d'énergie pour l'installation d'un système DAS (mesure sismique sur une fibre optique) dans le cadre de l'ANR Tellus qui sera installé en 2023 (voir paragraphe ANR Tellus).

Cependant, l'accès à ce relais se fait en véhicule 4x4 via une piste. A l'heure actuelle le dernier quart de la piste est impraticable et l'acheminement du matériel n'est pas possible. L'hélicoptère pourrait permettre l'héliportage du matériel, mais cette solution reste ponctuelle et coûteuse, difficile à mettre en œuvre compte tenu de nombre d'aller et retour à effectuer. De plus les interventions par mauvais temps ne sont pas possibles par héliportage, ce qui peut poser des problèmes majeurs en cas d'interventions urgentes. Le Conseil départemental, propriétaire du terrain a été approché pour que la remise en état de la piste puisse se faire.

*Conception et développement*

- Veille technologique

Afin de garder un réseau performant, une veille technologique est assurée par l'ensemble de l'équipe technique suivants les domaines d'expertise de chacun.

- Transmission

Mise en œuvre matériel et logiciel dans le cadre du développement d'une solution de télécommunication sécurisée, durcie et low-power avec la technologie 4G et du matériel Mikrotik ; développement d'un wach-dog matériel pour les Mikrotik ; déploiement à Mayotte et sur le réseau du Piton de la Fournaise dès lors que les données transitent par un FAI externe.

- Gestion de l'énergie

- Développement d'un programme de surveillance pour un nouveau modèle de régulateur solaire MPPT (ML4860) et d'un programme de génération de graphes à partir des données MPPT.
- Correctif sur le programme de monitoring ZLAN pour la gestion à distance des alimentations des équipements des stations (meilleure gestion du multithread).
- Développement d'une solution sans fil d'activation de relais (on/off énergie).

- Projet inclinomètre

Via l'Appel à Projet de l'IPGP, la conception d'un banc de calibration pour les capteurs inclinométriques a été financée en 2019 ainsi qu'un stage L3 de 4 mois en 2020 (financement OVPF). Deux professeurs de lycée en mécanique et en électronique ont également travaillé sur ce projet pour leur dossier de concours à l'agrégation.

La réalisation mécanique et la partie électronique sont achevées (Figures 73 et 74). Des ajustages pendant le développement sont à prévoir. La partie régulation de température des capteurs est assemblée ; le code de contrôle est en cours de réalisation.

Des inclinomètres de Blum ainsi que des inclinomètres Spectron ont pu être testés et calibrés sur le banc.

*Figure 73 : Photos d'ensemble du banc de calibration et de la table linéaire.*

Les premiers résultats sont conformes aux calibrations initiales et permettent donc d'avoir maintenant une courbe de calibration complète. Néanmoins les tests doivent se poursuivre pour affiner le résultat final.

Une amélioration des supports de référence sont en cours de validation afin d'assurer une certaine stabilité dans les mesures. La partie régulation en température doit être développé et mise en production pour avoir des courbes de calibration en fonction de la température.

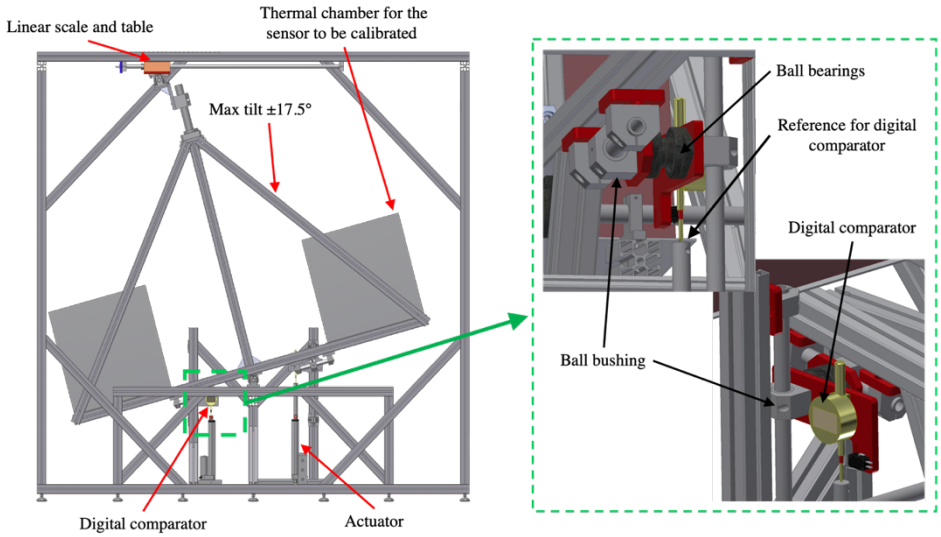


*Figure 74 : Banc de calibration : plusieurs capteurs peuvent être calibrés en même temps. Comme le comparateur a une faible gamme de mesure, la surface de référence est donnée par le vérin (total range 200mm). Dimensions du banc : environ 2 x 2m.*

Un autre projet directement lié au banc de calibration est en cours avec la conception d'un instrument inclinométrique de petite taille pouvant être placé dans un « mini-forage » d'un mètre de profondeur environ dans la roche, avec des moyens légers pour l'installation. Le premier prototype avec la carte électronique, les capteurs et le conditionnement mécanique a été testé sur le banc de calibration et dans un mini forage à côté du banc.

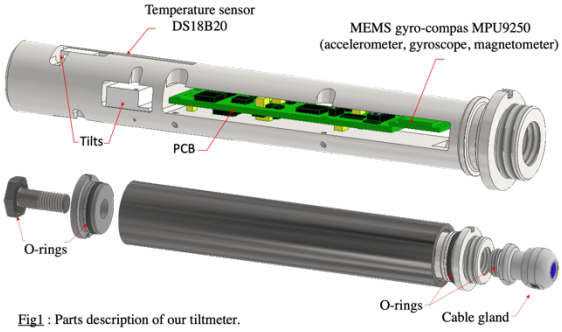


Fig1 : Parts description of our tiltmeter.

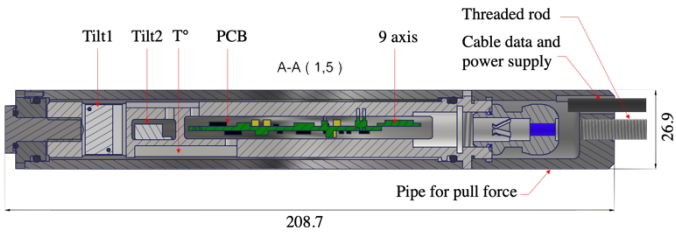


Fig2 : final tiltmer assembly with sectional view, dimensions are in mm. Threaded rod part is screw to the pipe for pull force to remove the tiltmeter from surface. It is removed when tiltmeter is installed.

*Figure 75 : A gauche, les différentes parties de l'inclinomètre. A gauche, assemblage final et description des éléments de l'inclinomètre avec une vue en coupe.*

Le niveau de bruit enregistré n'est pas très satisfaisant (plusieurs dizaines de microradian). Du fait de la très petite taille de la carte électronique, plusieurs points pourraient être retravaillés : fragilité des pistes lors des soudures, la mise en place de connecteurs pourrait palier ce point et inclure un plan de masse pour diminuer éventuellement le bruit. Le mini-forage actuel se trouvant dans le bâtiment de l'OVPF, plusieurs sources de bruit peuvent contribuer à la mauvaise qualité du signal. Un test in situ est nécessaire afin d'évaluer le réel niveau de bruit. Une étude sur table pourrait être envisagée pour évaluer le niveau de bruit électronique avec un design n'ayant aucune contrainte d'encombrement. Cela constituerait une référence à atteindre pour le pcb miniaturisé, à condition que le niveau de bruit soit satisfaisant.

- Données lentes -> PC

L'évolution des systèmes d'acquisition de données inclinométriques et extensométriques passe par un développement des moyens électroniques et logiciels des équipements embarqués. Aussi, l'adoption de la fréquence d'échantillonnage à 1Hz engendre des modifications et des corrections. La mise en œuvre du filtrage via l'ordinateur embarqué ou l'acquisition est en cours de développement.

Afin de répondre aux standards des échanges de données, un travail de fond est en cours pour valider la conversion des données lentes, inclinométriques et extensométriques principalement, au format miniSEED pour les distribuer à la communauté scientifique : conversion des données à l'OVPF avec un plugin spécifique de Seiscomp.

- Anémomètre

En cours de développement : intégration d'un capteur de vent sur les stations fortement exposées aux bourrasques afin de discriminer le signal d'origine volcanique de celui des rafales sur le signal sismique (station NSR à Nez Coupé de Sainte Rose pour validation). Ce capteur doit consommer peu d'énergie.

- PC embarqué

Pour remédier à l'obsolescence et au vieillissement des PC embarqués sur les stations inclinométriques, extensométriques et sismométriques, un nouveau type d'équipement et d'architecture (OrangePi, disque SSD) a été développé et est en phase de déploiement suivants les besoins.

- GETS : Geochemical Easily Transported System

Conception d'une station géochimique avec des capteurs low-cost et facilement transportables (Figure 76). Ce prototype, en cours de développement, permettra d'installer des capteurs au plus proche d'un site éruptif ou sur un drone. Ce projet a démarré en collaboration avec le LACy, Laboratoire de l'Atmosphère et des Cyclones de l'Université de la Réunion et le financement de l'OSU-Réunion avec notamment deux stages IUT de 4 mois en 2019.

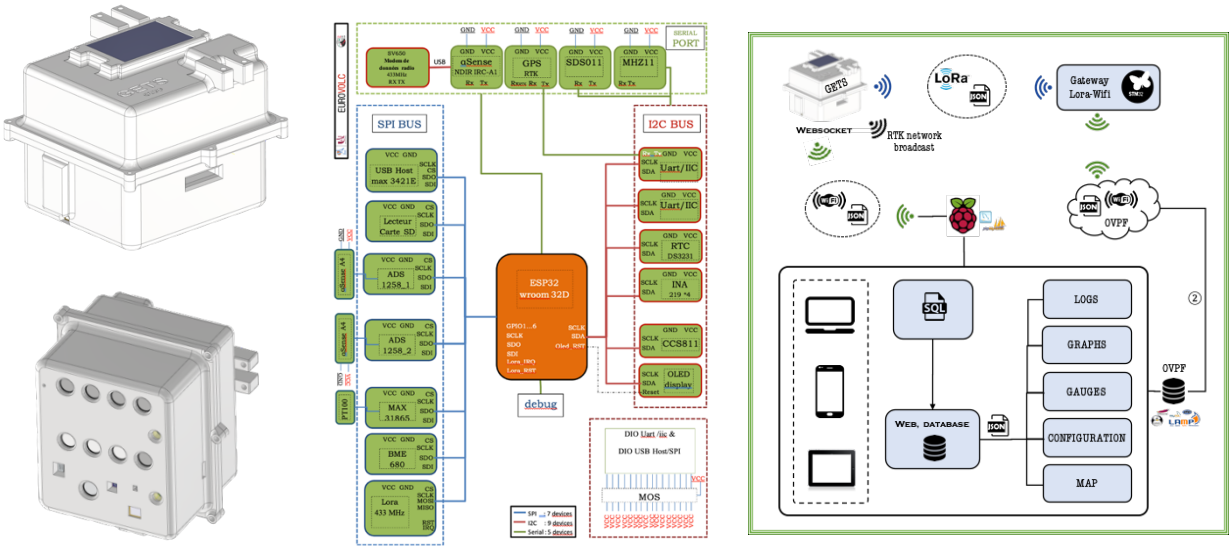


*Figure 76 : Modélisation 3D et synoptique.*

Au cours de l'année 2020 et 2021, un technicien en CDD de 12 mois financé par le projet européen Eurovolc a travaillé sur le cahier des charges de l'IHM (Interface Homme Machine), la conception et le développement de l'interface graphique utilisateur, le tracé des grandeurs physico-chimiques, la gestion de la base de données et la rédaction d'une documentation complète. Un stagiaire ingénieur a également travaillé sur la partie hardware en développant le code embarqué.

Les cartes électroniques ont été sous-traitées et ont été assemblées et testées en 2022. Un troisième prototype mécanique en impression 3D, plus compact, a été réalisé. Les différents éléments seront ensuite intégrés pour une validation fonctionnelle (en cours).

- RTK

Conception et développement d'une solution RTK (Real Time Kinematic) embarquée pour l'ortho photogrammétrie aéroportée. Le schéma se compose d'un équipement GNSS RTK directement relié à un appareil photo haute résolution et couplé avec une base GNSS du réseau de l'OVPF, avec différentes solutions de transmission numérique (Lora, 4G, Wifi). La finalité est d'avoir une meilleure résolution des prises d'images lors des survols en ULM pour modéliser les coulées de lave sur le massif du Piton de la Fournaise.

Une partie de l'électronique a été sous-traitée et le conditionnement mécanique réalisé en interne en impression 3D. Une interface sur une page web a également été développée pour interagir facilement avec les équipements. Les premiers résultats sont concluants : des tests avec différentes antennes, une meilleure intégration mécanique et quelques modifications sur l'interface restent à développer.

- Valorisation

Ces différents projets ont été valorisés lors de deux colloques/congrès (cf. section 13) :
*- JAG, Journées Aléas Gravitaires, Montpellier, juin 2022 : présentation des projets banc de calibration, inclinomètre et RTK.*
*- AGU, American Geophysical Union, Chicago, décembre 2022 : poster sur le projet inclinomètre et banc de calibration.*

*Collaborations sur projets*

- Projet Magnétisme – OPGC-LMV-Université Clermont Auvergne

Dans la continuité de l'ANR SlideVolc et du projet ANR JCJC Scan4Volc qui a débuté en 2022 (cf. section 9), la mise en œuvre de mesures géophysiques notamment magnétiques, s'est avérée primordiale pour renforcer le réseau d'étude et la compréhension du système dans son ensemble.

Une nouvelle station de variations magnétiques a été installée en décembre 2020 (GSM90, financement SNOV-CNES) au sommet du Piton de la Fournaise au sud du cratère Bory à proximité de la station sismique.

L'objectif est aussi de poursuivre l'expérience en effectuant des mesures Magnéto-Tellurique MT ponctuelles complémentaires (quelques jours de mesures sur différents sites pour compléter l'étude structurale, plusieurs séries de mesures avant et après une éruption par exemple si l'activité le permet, time lapse) pour imager la distribution des résistivités à grande profondeur dans le cadre d'une étude structurale en lien avec la dynamique de l'édifice impliquant :
1) L'installation et la maintenance d'une station MT dans l'Enclos du Piton de la Fournaise sur différents sites et d'une station de référence (hors enclos) pour la correction des mesures.
2) L'analyse des données par cycle d'acquisition et modélisation 1D.
3) L'intégration au jeu de données existant et modélisation 2D.
4) Selon l'activité éruptive sur la période considérée et les résultats issus des mesures en différents points, la comparaison avec les signaux sismiques.

Il s'agit donc d'une approche à la fois structurale et méthodologique, dédiée à mieux quantifier à court terme la pertinence de l'installation d'une station MT permanente dans la caractérisation de l'édifice et de son fonctionnement à grande profondeur. Ici aussi la perspective d'installer, à terme, une station MT dans le secteur du Flanc Est apparait particulièrement prometteuse.

Notons enfin que ce projet d'installation 1) d'un nouveau réseau de stations magnétiques et 2) de stations MT sur l'édifice du Piton de la Fournaise s'inscrit dans un programme global de valorisation et de mutualisation des données au sein de la communauté scientifique française (notamment au sein du SNOV).

Ainsi, une station magnéto-tellurique sera installée sur le site de GBNG (Grand Brûlé), sur le site de ENO (Enclos Nord-Ouest) et sur le site de CFN (Cratère Fontaine). La gestion de l'énergie de ces stations doit donc être repensée :

- GBNG (Grand Brûlé Nord) : remplacement du panneau solaire actuel par une structure 2 panneaux solaires, batteries, gestion de l'énergie et une transmission 4G pour avoir les données en temps réel.
- ENO (Enclos Nord-Ouest) : remplacement de la structure actuelle par une structure 3 panneaux ou 2x2 panneaux solaires.
- CFN (Cratère Fontaine) : station qui remplace la station FLR (Flanc est, détruite en avril 2020). La station magnéto-tellurique a été intégrée dans la réalisation de la nouvelle infrastructure

 Projet BlueSeis - Université de Potsdam (cf. section 9)
L'installation pour quelques années d'un nouveau type de capteur sismique rotationnel BlueSeis à la station RER a pu avoir lieu en 2021 avec une mise à disposition des données en temps réel sur les serveurs de l'IPGP. Un second capteur avec une antenne sismique associée a été installé à la station CSS (Cratère Séry) en 2022. Préparation, étude et validation par l'équipe technique de l'OVPF : dimensionnement des aspects énergie et transmission des données et intégration des nouveaux équipements sur les stations existantes. Un dispositif en antenne sismique a également été installé par l'OVPF avec 7 stations dans l'Enclos Fouqué. Toutes les données sont transmises en temps réel à l'OVPF et la maintenance est assurée par l'OVPF (Figures 77, 78 et 79).

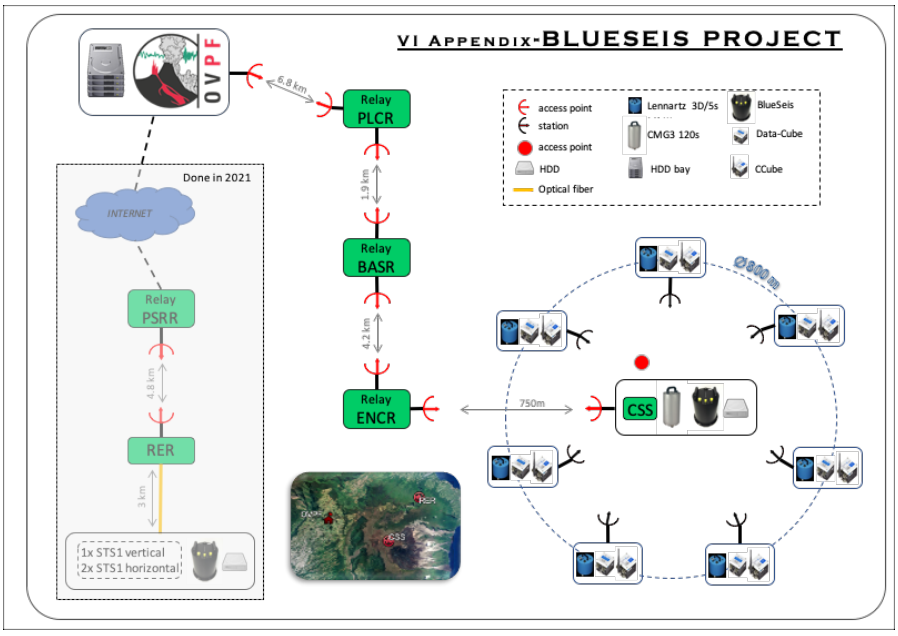


*Figure 77 : Architecture des équipements installés pour le projet.*

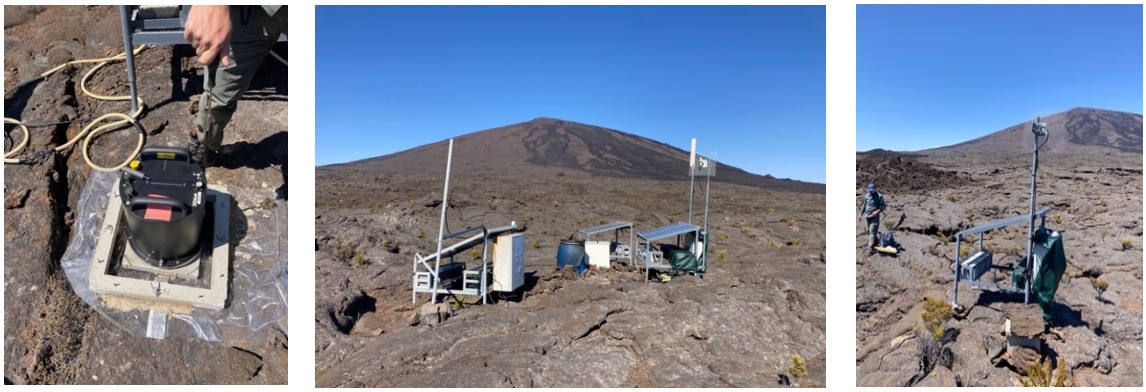

*Figure 78 : Installation des équipements in situ. A gauche, le sismomètre rotationnel à la station CSS (Cratère Sery), au milieu l'infrastructure de la station CSS, à droite une des 7 stations sismiques constituant l'antenne sismique autour de CSS.*

*Figure 79 : Localisation des stations du projet dans l'Enclos Fouqué.*

- Laboratoire Géoscience Réunion, LGSR, Université de la Réunion

Collaboration pour la transmission en temps réel des données d'une station située dans la rivière des pluies RVP : mise en place d'un relais, des équipements de transmission et de télémaintenance, maintenance.

*Accueil d'équipements extérieurs*

Dans le cadre de différentes conventions et de différents projets, l'OVPF accueille dans son réseau des équipements d'établissements extérieurs et des équipes de l'IPGP :

- Station GNSS, IGN

Sur le site de l'observatoire à la Plaine des Cafres, station de référence GNSS REUN.

- Système de référence DORIS, IGN

Sur le site de l'observatoire à la Plaine des Cafres, système développé par le CNES conjointement avec l'Institut national de l'information géographique et forestière IGN et le Groupe de Recherches de Géodésie Spatiale GRGS. Ce système a pour objectif de positionner finement des satellites d'observation.
La station DORIS a été déplacée en 2020 et à ce titre l'équipe technique a accompagné le CNES dans le choix d'un nouvel emplacement sur le site de l'OVPF, la réalisation d'un pilier et l'intégration du flux de données dans l'infrastructure de l'OVPF.

- Laboratoire PIMENT, Université de La Réunion

Sur le site de l'observatoire à la Plaine des Cafres, installation de plusieurs bâtiments à échelle réduite afin de quantifier l'impact d'un environnement des hauts de La Réunion sur le comportement thermo-hydrique de certains matériaux et composants du bâtiment.

- Pyrgéomètre, LE2P, Université de La Réunion

Sur les sites de l'observatoire à la Plaine des Cafres et de CBO (Cratère Bory), le laboratoire Energétique Electronique et Procédés (LE2P) de l'université de La Réunion a déployé des stations d'observations fines du gisement solaire (projet GEO-SUN). Les mesures effectuées par le pyrgéomètre installé sur le site de CBO ont également vocation de permettre une discrimination de la part du rayonnement solaire dans les mesures effectuées par la caméra thermique de l'OVPF, installée sur le même site.

- Camera IRT

Une caméra haute résolution et pilotable à distance est installée sur le site de Piton de Bert en collaboration avec l'Ile de La Réunion Tourisme IRT (Région Réunion).

- CNES, SVOM, Space-based multiband astronomical Variable Objects Monitor

Dans le cadre du monitoring des sursauts gammas provenant de l'espace, le SVOM a installé en 2020 deux antennes VHF sur le site de Bourg Murat. L'équipe technique a accompagné le SVOM dans le choix de l'emplacement et l'intégration du flux de données dans l'infrastructure de l'OVPF et assure la maintenance de premier niveau.

- OPGC, Observatoire de Physique du Globe de Clermont-Ferrand (cf. section précédente)

Installation d'une station magnétique à la station BOR (Bory) : cette station sera pérennisée en 2022 pour intégrer le réseau de surveillance du Piton de la Fournaise avec l'ANR JCJC Scan4Volc.

- Université de Potsdam, Institut für Geowissenschaften (cf. section précédente)

L'installation pour quelques années d'un nouveau type de capteur sismique BlueSeis à la station RER a pu avoir lieu en 2021 avec une mise à disposition des données en temps réel sur les serveurs de l'IPGP ; post-traitement des données et dataless en cours. Un second capteur avec une antenne sismique installé à la station CSS (Cratère Séry) en 2022 complète le projet. Préparation, étude et validation par l'équipe technique de l'OVPF : dimensionnement des aspects énergie et transmission des données et intégration des nouveaux équipements sur les stations existantes.

**Feuille de route pour 2023,** ci-dessous les principaux axes identifiés.

. Prospecter un nouveau site pour remplacer les stations VIL (Cratère Villèle)
. TKR (Takamaka) : modernisation de la station avec l'installation d'un sismomètre large bande, un numériseur et un récepteur GNSS ; redimensionnement de la partie énergie.
. VIL (Cratère Villèle) : installation de la station (sismomètre).
. CFN (Cratère Fontaine) : installation de la station (sismomètre, GNSS, inclino, météo, camera).
. LCRS (La Crête, Saint Joseph) : déterminer un site ; modernisation de la station (sismomètre 3 composantes, transmission).
. TEO (Saint Joseph) : moderniser la station (3 composantes et transmission 4G).
. CAS (Piston des Cascades) : réorganiser les équipements pour diminuer les effets des orages.
. GPN (Grandes Pentes Nord) : installation du pluviomètre de MétéoOI ; orientation du sismomètre.
. CPRS (Camp Pierrot, Salazie) : finaliser l'installation (clôture).
. CRA (Piton Crac) : refaire l'installation du sismomètre.
. BERI (Piton de Bert) : retirer l'inclinomètre de forage pour réparation et installation de celui destiné à ENCI.
. BRNR (Saint Joseph) : tout démonter après modernisation de TEO.

. BASR (Piton des Basaltes) : la partie haute de la piste devient inaccessible en 4x4 (rendant difficile le transport de matériel), une solution pérenne doit être mise en œuvre.
. Relais phonie : démonter les relais pour test et configuration.
. Réflexion sur la fabrication des inclinomètres de Blum.
. Finaliser la migration des fréquences et le remplacement du matériel de transmission des liaisons analogiques suivants les directives de l'ANFR.
. Données lentes : données miniSEED.
. Amélioration des installations de transmission numérique sur les principaux relais (BASR, BERR, ENCR). Optimisation des antennes UHF/VHF à BASR.
. Remplacement des récepteurs GNSS GB1000 obsolètes
. BASR (Piton des Basaltes) : modernisation et renforcement de la partie énergie, réfection
. BOR (Bory) : modernisation et renforcement de la partie énergie (suivant financement, 2022/2023).
. NSR (Nez Coupé Ste Rose) : remplacement de l'infrastructure et installation anémomètre (suivant financement, 2022/2023).
. TTR (Piton trois têtes) : modernisation de la station avec un sismomètre 3 composantes et GNSS (suivant financement, 2022/2023).
. GBNG (Grand Brûlé Nord) : modernisation de la station avec une transmission des données en temps réel, renforcement de l'énergie.

*Projets*

. OVK et OVPF : installation des dernières stations du projet Interreg HATARI.
. GETS : intégration des différents éléments et premiers tests de validation.
. Projet banc pour inclinomètre : mettre en œuvre la partie régulation en température du capteur ; améliorer la structure mécanique.
. Projet inclinomètre : effectuer les premiers tests de l'ensemble in situ ; conception, réalisation et assemblage d'une structure mobile pour guider la perceuse (mini forage) ; réalisation du module de surface ; amélioration du bruit électronique.
. Magnétisme : manip temporaire magnéto-tellurique à ENO et GBNG ; réalisation des infrastructures et installation
. Projet INSU DAS dans la Plaine des Sables (cf. section 9) : installation d'une fibre de plusieurs kilomètres, et réfection et modernisation du relais BASR

### Dégâts pour l'observatoire engendrées par le passage des cyclones Batsirai et Emnati

L'observatoire et son réseau de station ont été particulièrement impactés par le passage de deux Cyclones intenses à moins de 200 km des côtes réunionnaises le 3 février 2022 (*alerte rouge sur tout le territoire de La Réunion du 2 février 19h au 4 février 9h*) et « Emnati » à moins de 350 km des côtes réunionnaises le 21 février 2022 (*alerte rouge sur tout le territoire de La Réunion du 20 février 21h au 21 février 8h*).

*- Infrastructure, réseaux électriques, internet et terrain de l'observatoire :*
Le jeudi 3 février matin, une coupure EDF a impacté tout le village de Bourg-Murat où se situe l'observatoire. Le groupe électrogène de l'OVPF a pris le relais automatiquement afin d'assurer le fonctionnement et les missions de l'OVPF-IPGP. Le 8 février à 17h, une panne du groupe électrogène a mis en péril les missions de surveillance de l'observatoire. Parallèlement l'un des onduleurs de l'OVPF est tombé en panne. EDF n'est intervenu que le 10 et le 11 février pour remettre en état la ligne électrique alimentant l'OVPF. L'OVPF a pu intervenir sur le groupe électrogène le jour de sa défaillance pour éviter une coupure trop longue, et a fait intervenir quelques jours plus tard, sur fonds propres, un technicien pour diagnostic et réparation du groupe électrogène.

Lors du passage du cyclone « Batsirai », de nombreux arbres ont également été arrachés ou cassés sur la parcelle de l'observatoire ou le long de l'impasse menant à l'observatoire, empêchant un accès aux bâtiments jusqu'au dégagement de l'impasse par les équipes de l'OVPF (Figure 80). Le site a pu être remis en état rapidement suite aux interventions des membres de l'OVPF et du service technique de la commune du Tampon.

*Figure 80 : Arbres arrachés ou cassés sur le site et sur l'impasse menant à l'OVPF suite au passage du cyclone Batsirai.*

L'un des arbres a sectionné l'une des 2 fibres internet de l'observatoire et endommagé la seconde.

Lors du passage du cyclone « Emnati » et des fortes pluies associées, quatre bureaux ont subi des infiltrations importantes, avec une dégradation des murs, du plafond et des placos (Figure 81).

*Figure 81 : infiltration d'eau dans l'un des bureaux de l'OVPF suite au passage du cyclone Emnati.*

*- Stations de surveillance sur le terrain :*

*Cyclone « Batsirai »*
Le 5 février au matin, l'OVPF a perdu la connexion avec l'un de ses relais majeurs à Piton des Cascades, qui transmet l'essentiel des données des stations localisées sur le flanc est du volcan (soit environ 40% des stations installées sur le Piton de la Fournaise). A cette date, 16 autres capteurs situés au sommet du volcan n'étaient plus joignables. En tout, le 5 février, l'OVPF avait perdu la connexion avec 50% de son réseau situé sur le Piton de la Fournaise. Au retour de conditions météorologiques favorables sur la région de la Plaine des Cafres et grâce à la mobilisation des équipes de l'OVPF, une mission au site du Piton des Cascades a permis de remettre en fonction le relais est de récupérer 80% du réseau de surveillance le 6 février.

Le 8 février, les équipes de l'OVPF-IPGP ont pu se rendre au sommet du volcan et remettre en état une grande partie du réseau impacté par le cyclone (antennes tombées ou tournées, câbles arrachés ou portes de coffret arrachées). Néanmoins, l'OVPF a déploré des dégâts importants sur quatre stations de surveillance (DSOI, SFRC, PARI, BERN) dont la perte totale d'une station inclinométrique au sommet (DSOI) dont l'électronique et les coffrets ont été arrachés du sol et emportés sur une centaine de mètre (Figure 82, des rafales de plus de 150 km/heure ont été enregistrées dans la zone). Heureusement les capteurs n'ont pas été impactés.

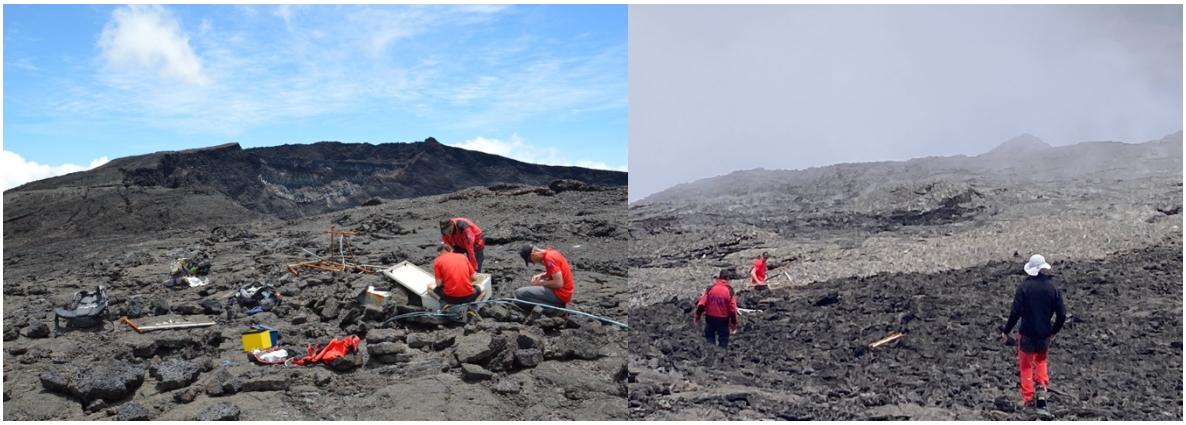

*Figure 82 : la station DOSI au sommet du Piton de la Fournaise arrachée et emportée sur une centaine de mètre suite au passage du cyclone Batsirai.*

*Cyclone « Emnati »*
Suite au passage du cyclone Emnati au plus près de La Réunion les 20 et 21 février 2022, le relais de Piton des Cascades a été une nouvelle fois impacté (et remis en état le 22 février 2022 par les équipes de l'OVPF-IPGP) et quatre autres stations de surveillance (hors dégâts liés au 1er cyclone) ont été impactées (DOEC, DSRG, CASG, BERI).

**Estimation des coûts de réparation et de remplacement des pertes de matériel engendrées par le passage des cyclones Batsirai et Emnati : environ 32 000 euros**

## > Réalisations informatiques

En 2022, le service informatique de l'OVPF a réalisé environ 800 tâches (participation à des projets, résolution de pannes, demandes spécifiques d'utilisateurs, dépannages divers, maintenance, etc.).

### Projets

- *Refonte du Système d'Information de l'Observatoire*

En 2022, le projet de refonte de l'infrastructure informatique de l'OVPF s'est poursuivi, avec notamment l'accueil d'un stagiaire d'IUT pour prêter main-forte à l'équipe informatique. Les documents de travail et la cartographie du réseau ont été actualisés afin de préparer l'arrivée de l'étudiant.

De manière plus détaillée, le service informatique de l'OVPF a procédé à :

- La mise en place de câbles d'alimentation de couleur pour les serveurs en fonction des arrivées d'alimentation onduleur (meilleur repérage des sources de courant), la mise en production des barres d'alimentation IP (administrables à distance) préinstallées l'année précédente.

- L'optimisation et la simplification du réseau avec la mise en place d'une rocade entre les baies. Cela a permis de changer de place les switchs serveurs, de refaire proprement le câblage réseau de toute l'architecture serveurs et de libérer de la place en enlevant les anciennes rocades fixes.
- L'installation de 3 nouveaux serveurs dans la baie :
  - un nouveau serveur de virtualisation Proxmox 7,
  - un serveur de stockage TrueNAS (futur remplacement de la solution de stockage principal),
  - un nouveau serveur de stockage Synology (stockage capacitif).
- La configuration et les tests du TrueNAS (gestion fine des droits d'accès et des tâches de sauvegardes) en vue de la migration de notre ancienne solution de stockage. Il reste un point bloquant au niveau de la restauration des sauvegardes que nous prévoyons de solutionner au plus vite courant février 2023.
- La mise en œuvre d'une infrastructure matérielle de test (« lab ») pour la mise en place de l'architecture parallèle. Le lab a été interrompu en raison de sa consommation électrique trop importante et va être migré dans un bâtiment annexe de l'OVPF.
- Le déploiement de nouveaux services :
  - Finalisation de la configuration serveur d'annuaire Samba AD et lien avec les différents services.
  - Nouvelle instance de GLPI (outil de gestion de parc informatique / technique). Migration des données de l'ancien système vers le nouveau.
  - Nouveau wiki (Bookstack) pour la documentation et les procédures. L'outil n'est pas encore ouvert au reste de l'équipe. Il est en cours d'alimentation.
- La mise en place d'une nouvelle convention de nommage plus explicite pour les machines du service informatique.
- La préparation de la migration de l'ancienne solution de stockage (points avec les utilisateurs, nouvelle arborescence, nettoyage des données, etc.).

- *MARMOR*

Dans le cadre du projet MARMOR (cf section 11), le service informatique participe activement à deux groupes de travail.

- Dans un premier groupe de travail, le service informatique participe activement à la rédaction du cahier des clauses techniques particulières « *Conception et réalisation d'équipements d'alimentation/distribution électrique et d'équipements marinisés de contrôle-commande pour l'observatoire sous-marin câblé de Mayotte* ». Il est en charge de la rédaction des spécifications du « *réseau informatique et architecture système* » et de « *l'interface home machine* » du système de commande et de supervision du réseau sous-marin câblé.
- Dans un second groupe de travail, le service informatique participe à la rédaction du cahier des charges de la conception de « *Station Fond de Mer REVOSIMA* ». Le service informatique intervient sur les aspects protocoles de communication numériques et l'interopérabilité avec les systèmes d'acquisition et de traitement de données de l'OVPF/REVOSIMA.

Le service informatique participe à des réunions hebdomadaires avec les intervenants de ces deux groupes de travail.

- *Station de variations magnétiques de BORY*

La collaboration avec le LMV-OPGC-Clermont Auvergne a permis l'installation d'une station de variations magnétiques en test à la station BORY en 2020 (détaillé dans la section « Réalisations techniques »). Un système plus robuste a été installé en 2022. Il est basé sur une architecture matérielle BeagleBone et développé par un autre observatoire de l'IPGP : l'observatoire magnétique national de Chambon la Forêt.
En particulier, le service informatique a réalisé :

- La prise en main de la solution BeagleBone d'acquisition données magnétiques.
- La mise en œuvre de l'acquisition automatisée des données (en cours de déploiement).

- *Projet « BlueSeis, Seismic Precursory Signals before Effusive Eruptions at La Réunion »*

Le service informatique intervient dans ce projet (détaillé dans la section « Réalisations techniques » et section 9) à plusieurs titres :

- Configuration des systèmes Seiscomp de l'OVPF pour l'acquisition et le stockage des données des 7 nouvelles stations sismiques.
- Intégration de ces stations dans les systèmes de supervision et de contrôle de qualité de données de l'OVPF.
- Fourniture hebdomadaire de jeux de données aux partenaires de l'Université de Potsdam.
- Aide à la définition et à la validation des métadonnées de ces stations (en cours).

- Mise en œuvre de la distribution automatisée des données vers les partenaires de l'Université de Potsdam (nécessite les métadonnées pour fonctionner).

- *Interventions pour l'Observatoire Volcanologique du Karthala (OVK)*
  - Aide au chiffrage d'une infrastructure serveur et à la rédaction d'un rapport sur la modernisation de l'OVK.
  - Échanges et préconisation en matière de cyber sécurité.
  - Points ponctuels avec l'équipe de l'OVK

**Développement**

- *AUTORINO : la nouvelle chaîne d'acquisition GNSS des Observatoires Volcanologiques et Sismologiques (OVS) de l'IPGP*

Le projet AUTORINO (Assisted Unloading, Treatment & Organisation of RINex Observations) vise à moderniser et unifier les chaines d'acquisition GNSS des Observatoires Volcanologiques et Sismologiques (OVS).
Le service informatique participe activement à ce projet à travers :

- La rédaction des spécifications de ces nouveaux outils en partenariat avec la direction des OVS.
- L'assistance à la définition des méthodes et des outils de génie logiciel.
- La participation hebdomadaire à la réunion du groupe de travail.

- *WebObs*

WebObs est un système opérationnel, développé par François Beauducel (physicien à l'IPGP) qui apporte des réponses aux problématiques de gestion de données de surveillance dans un environnement pluridisciplinaire et dans le cadre d'un observatoire. Ce système prend la forme d'un portail web de surveillance intégré temps réel et devient un support d'échanges solides pour le personnel scientifique et technique. Il est largement ouvert à la modélisation interdisciplinaire en temps réel.

François Beauducel est venu deux fois en mission à l'OVPF en 2022. Ces missions ont permis le développement de nouvelles fonctionnalités et corrections de bugs :

- Correction d'un bug associé au formulaire de demande d'accès à WebObs.
- Correction d'un bug sur la durée de validité d'un utilisateur WebObs.
- Correction d'un bug d'exportation des évènements WebObs au format iCal.
- Correction d'un bug d'affichage du résumé des évènements WebObs.
- La finalisation de la migration de la base de données d'intervention de l'OVPF dans WebObs, la mise au propre.
- Ajout d'une nouvelle PROC* pour la visualisation des données extensométriques.
- Amélioration de la PROC* pour la visualisation des données inclinométriques.
- Amélioration de l'interface d'administration du planificateur de tâche WebObs (scheduler).
- L'assistance à la définition des méthodes et des outils de génie logiciel.
- Spécification d'un SefraN simplifié à but pédagogique (dans le cadre d'un projet « *Mission pour les Initiatives Transverses et Interdisciplinaires* » CNRS / REVOSIMA).
- Recensement des besoins et améliorations à apporter à WebObs auprès de l'équipe OVPF/REVOSIMA.
- Réflexion sur l'organisation de la gouvernance et des développements de WebObs.
- Rédaction du dossier de labélisation de WebObs INSU-TS.
- Mise au propre des NODES*, VIEWS* et PROCS* (uniformisation des métadonnées, des fuseaux horaires, etc.).
- Mise à jour des bulletins semi-automatiques OVPF et REVOSIMA.
- Intégration des données produites par l'application CovSeisNet (détection et localisation de signaux sismo-volcaniques) au sein de WebObs.

[* *Définition acronymes utilisés dans WebObs :*
*. un NODE représente une ressource (capteur, station, équipement, batterie, etc.)*
*. une VIEW représente un groupe de NODES correspondant en général à une discipline spécifique afin d'organiser leur gestion et de proposer une carte pour les situer*
*.une PROC permet, à travers une liste de NODES de type capteur et des données correspondantes, d'effectuer des calculs spécifiques, de la modélisation et d'afficher les résultats associés*]

- *Maintenance applicative et correction de bugs sur les applicatifs développés en interne*

L'OVPF/REVOSIMA développe et maintien des scripts d'automatisation, de traitement de données, de supervision (codés en Bash, Perl ou Python principalement). Nous développons aussi des applications répondant aux besoins spécifiques de nos missions (alarme téléphonique, logiciel d'acquisition de données, etc.).
Des opérations de maintenance applicative sont régulièrement opérées sur ces codes informatiques (correction de bug, ajout de fonctionnalité, refactorisation liée à des montées en version de système d'exploitation ou dépendances, etc.).

**Administration système**

- Mises à jour :
  - Progiciels : WebObs (passage de la version 2.3 à la 2.5) et progiciels de traitement et calcul GNSS (*GAMIT : mise à jour incrémentale mensuelle, Gipsyx : passage de la version 1.7 à la 2.1, Spectra Precision Survey Office : passage de la version 4.5 à la 5.7).*
  - Parc informatique : mise à jour des firmwares des équipements réseaux, montée en version des systèmes d'exploitation des serveurs physiques et virtuels, installation du nouvel antivirus de l'IPGP F-Secure (parc Windows intégralement migré, reste le parc MacOS à faire).

- Mise en place d'un serveur pour l'outil YASMINE de création normalisée des fichiers de métadonnées des stations sismologiques en remplacement de l'outil historique PDCC. Le format des métadonnées sismique va ainsi passer du DATALESS (norme SEED) au standard international FDSN StationXML.

- Intégration de trois nouvelles stations sismologiques dans l'infrastructure d'acquisition et de traitement (MBUZ pour le REVOSIMA ; C98 et RVP pour l'OVPF).

- Déploiement de l'application CovSeisNet (détection et localisation de signaux sismo-volcaniques) en complément des autres méthodes de localisation de sources de trémor.

- Mise en œuvre de réservation d'adresses IP en fonction des adresses MAC des utilisateurs pour résoudre des problèmes de ralentissement du réseau et les pénuries de baux DHCP.

- Mise en place d'une routine informatique mensuelle (suivi des mises à jour, maintenance préventive, revue de la sécurité informatique, etc.).

- WebObs :
  - Création de 10 nouveaux comptes, mise à jour de la base utilisateurs.
  - Création de NODE « infrastructure » pour chaque NODE de capteur.
  - Création de NODE pour les nouvelles stations REVOSIMA.

- Tâches routinières d'administration système : sauvegarde, supervision, gestion des espaces disque, remplacement de composants défectueux, diagnostic et résolution de pannes, etc.

**Administration réseau**

- Installation d'un nouveau switch KVM tiroir (accès multi-ordinateurs, avec plusieurs canaux vidéos et périphériques USB) pour faciliter l'administration des serveurs en mode console.

- Interventions de terrain pour des pannes informatiques sur des sites distants (CAS, MVL).

- Suite aux passages des cyclones Batsiraï et Enmati en février 2022 (cf. section précédente), l'OVPF a subi une panne électrique le 8 février (panne sur le groupe électrogène qui était en fonctionnement depuis le 3 février suite à coupure EDF) qui a provoqué l'arrêt de l'ensemble du système d'information de l'observatoire. L'interruption de service a duré 4

heures 25 minutes. Le passage de ces deux cyclones a engendré également d'importants dégâts sur les deux fibres internet de l'OVPF. La liaison nominale a été fortement endommagée (câble à terre et perte de la gaine protectrice, ce qui laissait le câble très vulnérable) et la liaison de secours a été complètement coupée suite à la chute d'un arbre. Il nous a fallu 3 mois de relances auprès des opérateurs pour qu'ils interviennent sur nos liaisons.

- Recâblage d'une partie de l'alimentation et des câbles réseaux des serveurs pour assurer une redondance totale en cas de coupure électrique. Il reste un point à améliorer : la rocade entre la partie serveurs et le cœur de réseau.

- Tâches classiques d'administration réseau : ouverture d'accès, mises à jour des règles du pare-feu, mise à jour des firmwares des switches, diagnostic et résolution des pannes, réparation et nettoyage au niveau physique dans la salle serveur, etc.

**Gestion du parc GNSS**

Diagnostic de pannes sur les capteurs GNSS (32 pannes diagnostiquées et résolues en 2022), configuration des récepteurs pour déploiement ou remplacement sur le terrain, gestion des commandes et du SAV, aide aux missions de terrains, gestion des métadonnées sur la plateforme européenne M3G, gestion de l'inventaire (ajout des nouveaux récepteurs documentation des pannes et des déploiements), configuration des systèmes d'acquisition et de traitement des données (GAMIT, GipsyX), distribution des données vers le Centre de Données de l'IPGP, etc.

**Administratif**

- Budget informatique

Gestion des budgets informatique, demande de devis, commandes, relances, suivi du SAV, gestion de l'inventaire (entrées et sorties), etc.

- Astreinte surveillance

Préparation des plannings d'astreintes et de gardes renforcées lors des éruptions pour l'ensemble de l'équipe, amélioration du suivi d'astreinte avec des tableurs plus lisibles.

- Mise en place de la production d'un rapport hebdomadaire des actions du service informatique pour le service technique.
- Gestion de l'équipe informatique.
- Déclaration auprès des services généraux de la mise au rebut de vieux matériels.
- Aide à la rédaction de la convention MTE pour la partie concernant le service informatique.

**Divers**

- Tâches quotidiennes en informatique :
  - Assistance aux utilisateurs et dépannage (répondre aux demandes, besoins particuliers et soucis informatiques).
  - Faciliter l'accès et fournir les données (actuelles et historiques) aux scientifiques.
  - Investigation et résolution des problèmes, bugs et pannes informatiques divers (affichage de données, corrections de scripts, configuration de matériel, etc.).
  - Gestion des nouveaux arrivants, des départs et du personnel en mission ayant des besoins informatiques (en 2022 : 1 doctorante, 5 stagiaires, 2 départs de personnels permanents, au moins 4 missions avec du personnel).

- Documentation

Production de documentation et mises à jour des procédures existantes, création de checklists, etc.

- Conférences et formations reçues
  - Conférence sur la cybersécurité organisée par la DGSI à Saint-Denis (en présentiel).
  - JRES 2022 à Marseille (en présentiel et en distanciel).
  - Journées Proxmox VE Ceph 2022 (série de visioconférences sur les outils informatiques éponymes).

  - Conférence Centipede RTK (visioconférence).
  - Formation Matinfo HPE (visioconférence).
  - Formation à l'outil YASMINE dispensée par Jean-Marie Saurel de l'IPGP.
  - Formations non informatiques : BBOBS (sismomètre de fond marin large bande, dans le cadre des missions REVOSIMA), mesure absolue du champ magnétique terrestre, SST.

- Formations délivrées
  - Formation à la gestion du parc GNSS pour un nouveau personnel de l'OVPF.
  - Mini-formation cybersécurité du lundi pour tout le personnel de l'OVPF.
  - Formation à l'utilisation des outils Git / Github pour tout le personnel de l'OVPF concerné.
  - Formation au diagnostic d'un équipement informatique de terrain (SG-1000) pour le personnel technique.

- Participation aux missions sur le terrain en dehors du cadre informatique
  - Interventions sur le réseau OVPF : RVP, FOR, NSR, C98, mesure magnétique hebdomadaire.
  - Dans le cadre du REVOSIMA : préparation et déchargement du laboratoire de travail pour la campagne MayOBS22, mission à Mayotte pour aider à la cartographie géochimique de l'archipel.

- Veille technologique

Réalisation d'une veille technologique pour rester au courant de l'actualité informatique, des menaces en cyber sécurité, des évolutions du matériel et des logiciels, etc.

- Stage Refonte du SI et aide au déploiement de Airflow

Accueil d'un stagiaire d'IUT Réseaux informatiques et Télécommunications (3 mois) pour nous épauler sur les projets de refonte du SI et de la solution d'orchestration de flux de données Apache Airflow.

- Installation d'ordinateurs
  - Mise en service (préparation et inventaire) de 3 ordinateurs portables, d'un ordinateur fixe (GNSS) et de 2 serveurs personnels.
  - Préparation d'ordinateurs pour les futurs stagiaires de 2023.

- Visite de l'observatoire du Maïdo (discussions avec l'équipe informatique).

- Scan des anciennes archives sismologiques (un carton de sismogrammes a été retrouvé lors du nettoyage de la salle serveur).

- Participation et relecture au dossier de demande de labellisation pour l'outil WebObs.

- Tests d'outils informatiques de supervision systèmes et réseaux
  - Grafana
  - NtopNG

## 9. Projets ambitieux au sein de l'OVPF ou en collaboration avec l'OVPF

### > Projets ANR

Un projet de l'Agence Nationale de la Recherche (ANR), focalisé sur le Piton de la Fournaise dans lequel l'OVPF est fortement impliqué, a débuté fin 2021 et s'est poursuivi en 2022.

**- ANR Scan4Volc : SCANner les édifices volcaniques par la géophysique sol et aéroportée : vers une modélisation 4D des dynamiques VOLCaniques (fin 2021-fin 2025)**
Porteur du projet : Lydie Gailler (LMV, Université Clermont Auvergne)
Laboratoires impliqués LMV-Université Clermont Auvergne, IPGP, Université de la Réunion
Montant : 458 304 euros
Lien : https://anr.fr/Projet-ANR-21-CE49-0015

Résumé du projet ANR Scan4Volc :
Imager les relations entre structures volcaniques profondes et manifestations en surface reste un challenge en volcanologie, pour mieux appréhender les risques associés à l'activité éruptive. Le comportement des systèmes volcaniques (magmatiques et hydrothermaux) dépend fortement de paramètres physiques. Les méthodes de résistivité électrique et magnétiques sont particulièrement pertinentes, car très sensibles aux teneurs en fluides, à l'altération et à la température. Ce projet a pour objectif de développer des approches récentes et innovantes (tomographie de résistivité 3D profondes, réitération de mesures magnétiques aéroportées) dédiées à une modélisation intégrée 4D des systèmes volcaniques. Le projet se focalise sur le Piton de la Fournaise (PdF), une cible majeure en termes d'objectifs à la fois scientifiques et sociétaux.

Pour progresser dans la connaissance de la structure et de la dynamique du PdF, le projet Scan4Volc est structuré en trois Work Packages (WP) complémentaires, chacun d'entre eux construit pour aborder une problématique majeure, dont les résultats permettront de contribuer à mieux gérer les risques volcaniques.

Le WP1 est dédié à l'imagerie multidisciplinaire à haute résolution du PdF en utilisant les progrès récents considérables des méthodes géophysiques (approches de résistivité 3D, mesures magnétiques par drone). Des approches innovantes de tomographie électrique 3D seront combinées à des sondages magnétotelluriques 1D profonds, à l'imagerie magnétique haute résolution par drone, et à la cartographie thermique IR. Ce couplage permettra de caractériser avec précision la géométrie des zones de faiblesse structurale et des systèmes magmatiques et hydrothermaux. Les réitérations de ces mesures en fonction des phases d'activité contribueront à quantifier l'évolution spatio-temporelle de la dynamique et des processus volcaniques, avant et après une éruption.

Le WP2 vise à une modélisation 4D des données de résistivité et de magnétisme par une approche multi paramétrique intégrée. Les données géophysiques acquises sur le terrain dans le cadre du WP1 seront modélisées en 4D en utilisant 1) des approches de modélisation numérique dédiées, 2) des contraintes provenant d'expériences en laboratoire sur les propriétés physiques d'échantillons soigneusement sélectionnés (par exemple, résistivité, magnétisation, porosité, perméabilité), et 3) des paramètres multidisciplinaires supplémentaires provenant d'observations et de recherches de différents groupes (par exemple, déformation, sismicité, fluides).

Le WP3 se concentre sur la gestion, la communication publique et le transfert d'expertise autour de l'évaluation des risques en relation avec les dynamismes magmatiques et hydrothermaux (éruption phréato-magmatique et phréatique), et les hétérogénéités mécaniques en profondeur (zones de faiblesse et trajets préférentiels, instabilités mécaniques). Ce volet gestion d'équipe et de projet-communication avec les autorités de protection civile et les acteurs du risque, est fondamental pour mieux prévoir les répercussions des crises volcaniques, tout en tirant parti de l'expertise des sciences sociales.

Sur la base d'une solide expérience dans les domaines envisagés, les connaissances acquises par les études géophysiques seront transférées à la communauté scientifique afin de renforcer les connaissances sur les autres volcans du monde. Une telle approche intégrée contribuera à la mise en œuvre d'algorithmes d'apprentissage profond sur diverses cibles dans le monde. A plus long terme, une telle approche contribuera donc à implémenter les algorithmes de deep-learning sur diverses cibles à travers le monde.

L'OVPF est également impliqué dans un deuxième projet ANR portant sur les interactions fluide-roche en contexte de dorsales lentes.

**- ANR RidgeFactory Slow : Interactions fluide-roche en contexte d'exhumation du manteau aux dorsales lentes. Étude d'un cas extrême peu magmatique (2018-2022)**
Porteur du projet : Mathilde Cannat (IPGP)
Laboratoires impliqués : IPGP - ISTEP (Sorbonne Université)
Montant : 478 332 euros
Lien : https://anr.fr/Projet-ANR-21-CE49-0015

Résumé du projet ANR RidgeFactory Slow :
Les dorsales médio-océaniques peuvent être vues comme des usines produisant la nouvelle lithosphère océanique qui sera recyclée dans le manteau aux zones de subduction. Cela implique des échanges hydrothermaux de chaleur et de matière avec l'océan, contribuant aux échanges à long terme entre la Terre solide et ses enveloppes fluides. Aux dorsales lentes (et certaines marges continentales distales), les nouveaux fonds marins comprennent des roches du manteau exhumées tectoniquement. Les réactions hydrothermales conduisent à l'hydratation de ces roches (serpentinisation), à la libération de volumes substantiels d'hydrogène et de méthane, à l'émission de fluides à pH élevé et à la cristallisation de carbonates et de composés carbonés réduits solides. Nous proposons de traiter les données de 2 campagnes océanographiques récentes pour contribuer à une meilleure compréhension de ces processus, en nous concentrant sur le cas extrême pauvre en magma de la dorsale Sud-Ouest Indienne orientale.

## > Projets européens

L'IPGP, et notamment l'OVPF, est impliqué dans cinq projets européens qui se sont poursuivis en 2022 :

. **Un projet ERC Starting Grant: PRESEIMIC The Nucleation of Earthquakes: Cascading and Unpredictable or Slowly driven and Forecastable (2019-2024)**
Porteur du projet : Zacharie Duputel (OVPF-IPGP)
Laboratoires impliqués : IPGP - ITES
Montant : 1 499 546 euros

Bien que les failles actives et les volcans constituent des environnements naturels très différents, il est instructif de comparer ces deux systèmes géologiques actifs. Dans les deux cas, il s'agit de milieux soumis à des variations importantes de contraintes et produisant une sismicité caractéristique. Notre compréhension des failles et des volcans est souvent limitée par la faible complétude des catalogues de sismicité et par la difficulté à modéliser l'évolution temporelle du chargement de ces systèmes. Dans le cadre du projet PRESEISMIC, nous développons différentes techniques de détection et d'analyse de sismicité qui sont utiles à la fois pour la compréhension de la nucléation des grands séismes et pour le suivi de l'activité volcanique. En parallèle à ces approches de détection de sismicité, nous développons des modèles décrivant l'évolution temporelle du glissement sur les failles actives à partir de séries temporelles géodésiques. L'objectif à terme est d'étendre cette approche au suivi temporel des sources de pression magmatiques au sein d'édifices volcaniques.

Publications 2022 associées à ce projet :

*C. Morales, Z. Duputel and L. Rivera (2022), Exploring the link between large earthquakes and magma transport at the onset of the Mayotte volcano-seismic crisis, 2022. Comptes Rendus. Géosciences, v. 354, pp. 1-16.*
*C. Twardzik, Z. Duputel, R. Jolivet, E. Klein and P. Rebischung, (2022), Bayesian inference on the initiation phase of the 2014 Iquique, Chile, earthquake, 2022. Earth Planet. Sci. Lett., v. 600, pp. 117835.*
*E. Klein, C. Vigny, Z. Duputel, D. Zigone, L. Rivera, S. Ruiz and B. Potin (2022), Return of the Atacama deep Slow Slip Event : the 5-year recurrence confirmed by continuous GPS, 2023. Phys. Earth Planet. Int., v. 334, pp. 106970.*

**. Un projet interreg : Hatari Les sources des aléas sismiques et volcaniques aux Comores (2021-2023)**
Porteur du projet : Andrea Di Muro (OVPF-IPGP)
Laboratoires impliqués : IPGP, CNDRS, LGSR-Université de la Réunion, Cité du Volcan
Montant : 628 971 euros

Le projet Hatari est coordonné par l'Institut de Physique du Globe de Paris (IPGP) sous la maîtrise d'ouvrage de l'Observatoire volcanologique du Piton de la Fournaise (OVPF). Le CNDRS - Centre National de Documentation et de Recherche Scientifique (Observatoire Volcanologique du Karthala ; Musée National) des Comores, le Laboratoire Géosciences Réunion (LGSR) de l'Université de la Réunion et la Cité du Volcan (Région Réunion) participent au projet.

Le projet Hatari s'intéresse au lien entre volcanisme et sismicité sur l'ensemble de l'archipel des Comores. Ceci, à travers plusieurs études (cartographie des failles et structures volcaniques, géomorphologie, suivi de l'activité volcano-tectonique, chimie des fluides et des magmas, installation de nouvelles stations de collectes des données sur Grande Comore, Anjouan et Mohéli), qui permettront d'établir un modèle de déformation tectonique régionale et de suivre et caractériser l'activité sismique et d'établir le lien avec l'activité volcanique récente.

Le projet étudie en détail l'activité volcanique historique du volcan Karthala. Il intégrera des études de terrain, des expériences de laboratoire, de la modélisation numérique et renforcera les observations en continu. Les étudiants réunionnais et comoriens ainsi que les intervenants du projet bénéficieront de formations techniques et scientifiques. Ces travaux seront valorisés dans les musées dédiés au Piton de la Fournaise à La Réunion (Cité du Volcan) et au Karthala aux Comores, à travers des expositions et des conférences.

Le projet est structuré à travers 3 Actions :

*Action 1 : Tectonique*
Spatialisation et caractérisation des sources des aléas sismiques et étude des liens avec l'activité volcanique, associée à un renforcement et une extension des réseaux géophysiques et géochimiques sur l'archipel des Comores.

*Action 2 : Volcanisme*
Reconstruction de l'activité récente du Karthala. Étude de la composition et de l'origine des magmas primaires et modélisation de l'origine des fluides magmatiques et hydrothermaux. Influence de la composition des magmas, des teneurs en volatils et de la dynamique de remontée sur les différents types éruptifs.

*Action 3 : Communication et formation*
Formation d'étudiants et de jeunes chercheurs tout au long du projet, couplée à un transfert de connaissances vers les acteurs en charge de la surveillance, de l'alerte et de la protection civile et vers la population.

Résumé des actions menées en 2022

WP0 Coordination :
- Visite de la direction du CNDRS et de l'OVK à l'OVPF et aux partenaires locaux à La Réunion.
- Rencontres partenariales à Moroni, notamment avec les acteurs de la coopération internationale pour identifier la meilleure stratégie pour garantir un soutien durable à l'observatoire volcanologique du Karthala.

WP1 Tectonique :
- Mission de terrain pour l'étude des laves les plus anciennes de la Grande Comore, notamment dans le secteur sud.

WP2 Géophysique :
- Finalisation de la production des nouvelles stations géophysiques et géochimiques à l'OVPF.
- Premières installations sur l'archipel et réparation des stations et du système d'acquisition au sein de l'OVK.

*Figure 83 : Station $CO_2$ sécurisée qui sera installée au sommet du Karthala. Cette station sera également pourvue d'une infrastructure pour accueillir les panneaux solaires.*

L'équipe technique de l'OVPF a géré l'étude, la conception et la réalisation de 4 stations à installer aux Comores, avec 3 stations équipées d'un sismomètre et d'un GNSS, et d'une station $CO_2$ (Figure 83). Les retards accumulés dans l'approvisionnement des équipements n'ont pas permis une installation complète en 2022. Cependant, une mission technique a pu avoir lieu pour commencer l'installation de deux stations. Avant de terminer les installations en 2023, plusieurs points doivent être résolus localement pour stabiliser le réseau de surveillance existant opéré par l'OVK (Observatoire du Karthala) : stabilisation de l'énergie à l'OVK, accès extérieur via internet, réalisation des dalles pour les stations.

WP3 géochimie :
- Analyses des roches totales des produits éruptifs du Karthala.
- Cartographie des émissions de $CO_2$ par le sol sur l'ensemble de l'île de la Grande Comore.

WP4 hydrothermalisme :
- Analyse chimique et thermique des champs fumeroliens au sommet du Karthala.

WP5 Dynamismes éruptifs :
- Étude de la variabilité des styles éruptifs du Karthala (Thèse F. Lötter) et étude de l'activité éruptive récente du volcan de la Grille.

WP6 Formation :
- Formation de deux agents du CNDRS/OVK au paramétrage et à la maintenance des systèmes de surveillance géophysique et à la manipulation des outils d'analyse de données sismiques.

WP7 Communication :
- Communication de l'OVK concernant l'état d'activité du Karthala et la signification de l'évolution récente des paramètres géophysiques et géochimiques.

. **EPOS (European Plate Observing System)** ; projet à long terme visant à construire une infrastructure paneuropéenne d'intégration de données, produits de données, services et installations en Sciences de la Terre, à partir d'infrastructures de recherche distribuées en Europe.

. **EUROVOLC (2019 – début 2022)** ; projet dans lequel les observatoires volcanologiques de l'IPGP sont fortement impliqués pour différentes actions de recherche, de transfert de savoir-faire et de networking de la communauté des observatoires volcanologiques européens.

## > Projets OMNCG OSU-Réunion

En 2022, l'OVPF a contribué à un projet financé par l'appel d'offre 2022 de l'OMNCG (Observations des Milieux Naturels et des Changements Globaux) de l'OSU-Réunion visant à financer des projets transversaux à caractère pluridisciplinaire.

. *Tomo-Piton* – (porteur du projet : J. Van Baelen, LACy, Université de La Réunion) – montant : 9 400 euros
Résumé : Construit dans la continuité du projet OMNCG 2020-2021 « Tomo-Piton », ce nouveau projet part de ces acquis pour étendre le champ des investigations et développer de nouvelles applications. Ainsi, lors du précédent projet, nous avions dans un premier temps adapté le logiciel de tomographie GPS au contexte de La Réunion : nouveau modèle numérique de terrain à plus haute résolution pour mieux prendre en compte les forts gradients d'altitude, positionnement des stations de référence, définition de l'atmosphère de référence (température et pression) pour le milieu tropical à partir de 2 ans de radio sondages. Ensuite, les premières applications avaient suivi le cycle diurne de vapeur d'eau sur les contreforts du volcan, mais aussi l'apparition d'un panache lors de l'éruption du 9 avril 2021.
L'objet de ce nouvel opus est double. D'une part, en collaboration avec l'ESGT, l'OVPF et l'OSU-R, il est question d'optimiser le code ainsi que le flux des données nécessaires pour un fonctionnement robuste de l'inversion tomographique. D'autre part, un focus particulier porte sur l'utilisation du champ de vapeur d'eau restitué pour s'intéresser à la correction des imageries InSAR de déformations du Volcan. Pour ce faire, il est nécessaire d'élargir le domaine de restitution et ainsi voir quelles sont les limites de résolution possibles avec le réseau existant sur La Réunion, au-delà du Piton de la Fournaise. De même, le processus de restitution du champ de vapeur d'eau est particulièrement adapté à la problématique de l'interférométrie InSAR et c'est pourquoi, au-delà de l'OVPF, le projet se fait en collaboration avec le SNO ISDéform (J-L Froger, Université Saint Etienne, et Fabien Albino, Université Grenoble Alpes).
Par ailleurs ces travaux vont aborder la question d'optimisation du réseau de stations GPS en vue d'une restitution fiable sur le plus grand domaine possible, pour des utilisations multiples d'étude du champ de vapeur d'eau en conjonction avec la dynamique atmosphérique, la couverture nuageuse et les précipitations.

## > Projets INSU-CNRS

. **Projet INSU-CNRS TelluS-ALEAS : Fibre optique à la Plaine des Sables**
Porteur du projet : Lise Retailleau (OVPF-IPGP)
Laboratoires impliqués : IPGP
Montant : 12 000 euros

**Intérêt scientifique et état de l'art**

Le Piton de la Fournaise est l'un des volcans les plus actifs au monde (Figure 84).

Les éruptions sont précédées par une phase de sismicité dont la durée est variable (Duputel et al. 2019, Peltier et al., 2021). La majorité de la sismicité est superficielle et est concentrée dans les premiers kilomètres de profondeur sous le sommet du Piton de la Fournaise. Une activité plus profonde et moins régulière marque des phases de réalimentation magmatique depuis des réservoirs profonds (Battaglia et al., 2005; Lengliné et al., 2016). Cette sismicité est distribuée entre 11 et 20 km de profondeur le long d'un axe Nord 130° entre le Piton des Neiges et le Piton de la Fournaise (Figure 85 rectangle rouge; Boudoire et al., 2017). Dans cette zone de nombreux cônes éruptifs ont été répertoriés (Figure 84b, Michon et al., 2015).

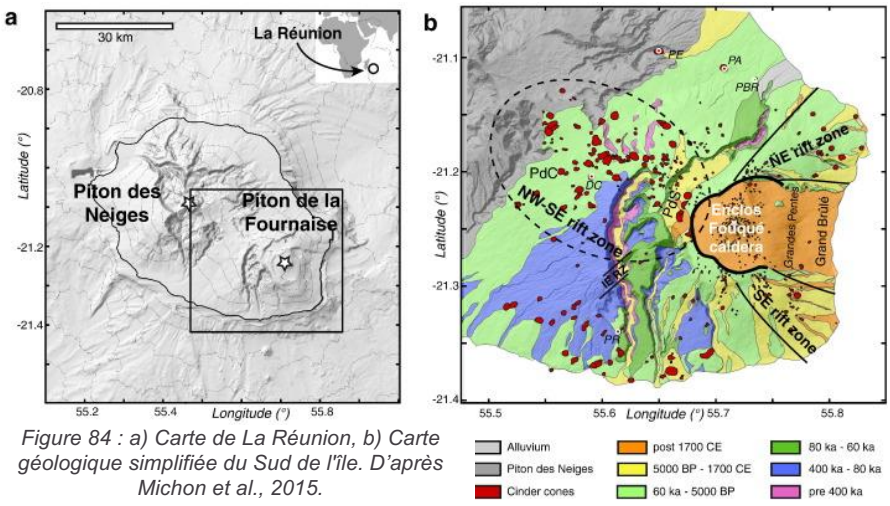


*Figure 84 : a) Carte de La Réunion, b) Carte géologique simplifiée du Sud de l'île. D'après Michon et al., 2015.*

Aucune sismicité significative n'a été observée pour connecter ces deux zones alors que des mouvements de fluides liés à la réalimentation en magma ont lieu comme vu par le dégazage ou les sources de pression à l'origine des déformations. Notre étude a pour objectif de détecter cette sismicité. La Plaine des Sables se situe à l'aplomb de cette zone à faible sismicité qui fait la jonction entre la Plaine des Cafres et la zone sommitale du Piton de la Fournaise. Elle n'est actuellement pas instrumentée. Au regard du transport magmatique dans la région, la Plaine des Sables est potentiellement associée à une sismicité mais qui n'est pas détectée du fait de sa faible magnitude et par manque d'instruments à proximité.
Par ailleurs, la structure sous-jacente de cette région - totalement recouverte de scories et associée à de nombreux cônes préhistoriques et failles - est encore mal connue (Principe et al. 2016). Avoir accès à une imagerie sous la Plaine des sables permettrait de retracer l'histoire de la zone et de mieux comprendre les mécanismes qui l'ont formé.

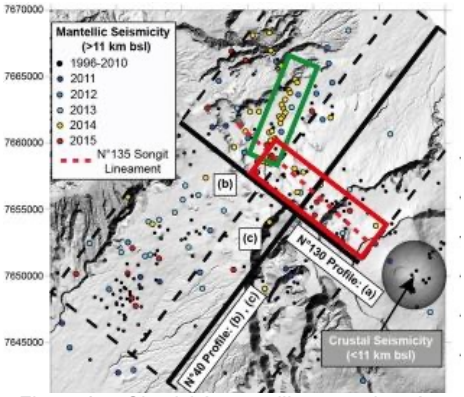

*Figure 85 : Sismicité mantellique cataloguée entre 1996 et 2016. D'après Boudoire et al., 2017.*

**Méthodologie**
Les mesures de DAS (Distributed Acoustic Sensing) sont des mesures faites sur fibre optique. Elles sont de plus en plus utilisées en sismologie. Cette méthode permet de transformer une fibre optique en une ligne de capteurs avec un échantillonnage très élevé grâce à un interrogateur qui injecte des signaux laser dans la fibre et traite le signal reçu en retour. Cette méthode a montré son efficacité pour la détection de signaux de faible amplitude et la caractérisation de structures en profondeur dans de nombreux contextes (Zhan, 2020).
L'installation d'une fibre dans la Plaine des Sables, suivie de mesures DAS, permettrait d'établir le lien entre la sismicité profonde sous la région Plaine des Palmiste / Le Tampon et les transferts de magma à l'aplomb de la zone sommitale du Piton de la Fournaise et ainsi mieux comprendre cette zone de transfert de magma.

Afin de caractériser la structure sous-jacente de la Plaine des Sables et rechercher une sismicité de faible amplitude liée à la réalimentation du Piton de la Fournaise depuis un réservoir excentré plus profond, nous proposons donc l'installation d'une fibre optique pour effectuer des mesures DAS.

**Déploiement de la fibre optique dans la Plaine des Sables**
Dans un premier temps, nos efforts se concentreront sur l'installation de la fibre optique dans la Plaine des Sables (Figure 86). L'objectif est de l'installer au plus près de la sismicité potentielle et de traverser la zone afin d'imager la structure profonde sur une large zone, tout en perturbant le moins possible la zone.

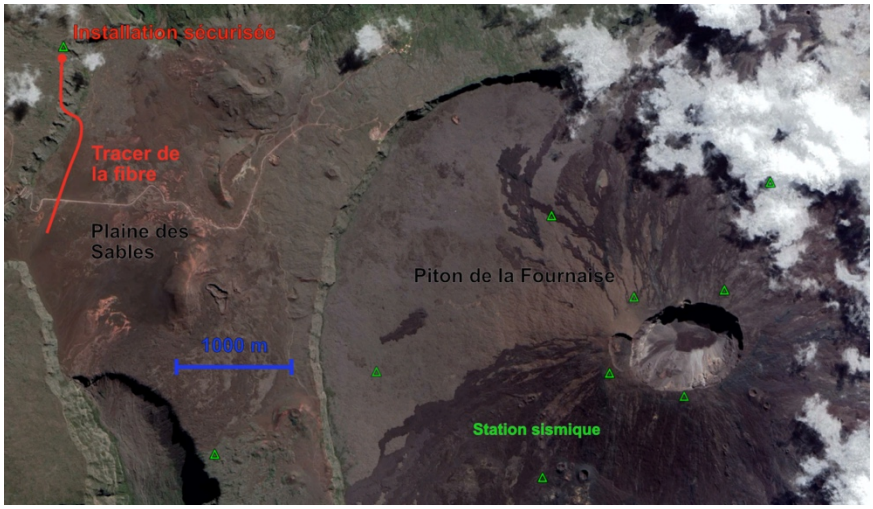

*Figure 86 : Position préliminaire de la fibre optique dans la Plaine des Sables.*

Pour un aspect pratique et pour perturber le moins possible l'environnement de la Plaine des Sables nous proposons d'installer le début de la fibre à Piton des Basaltes dans un relais de transmission de l'OVPF déjà existant. L'infrastructure du relais comprend plusieurs conteneurs qui peuvent aussi abriter et sécuriser le matériel de mesure DAS. Ce relais est alimenté par un nombre important de batteries rechargées par des panneaux solaires. Un ancien groupe électrogène en panne existe aussi sur place, nous envisageons donc sa réparation ou son remplacement pour compléter l'alimentation de l'instrument de mesure DAS sur lequel le début de la fibre sera branchée. Le relais du Piton des Basaltes est primordial pour la surveillance du Piton de la Fournaise et son fonctionnement ne doit pas être perturbé par les mesures DAS. Le groupe électrogène sera donc utilisé ponctuellement pour compléter les besoins en énergie et sera utilisé de façon à perturber le moins possible l'environnement.
La fibre sera déroulée depuis Piton des Basaltes pour descendre le rempart et ensuite pour traverser la Plaine des Sables. La fibre de couleur noire a un diamètre de 5 mm et aura donc un impact visuel très faible sur le paysage. Notre objectif est aussi d'enterrer légèrement (5-10 cm) la fibre dans la Plaine des Sables lorsque c'est possible. La fibre sera enterrée manuellement afin de ne pas perturber l'environnement. Nous choisirons un tracé relativement rectiligne dans la Plaine des Sables tout en évitant les plantes endémiques.
L'installation le long du rempart pourrait se faire à l'aide d'un hélicoptère ou d'un drone pour limiter l'impact de l'installation. Pour l'enfouissement dans la Plaine des Sables, des moyens légers seront utilisés avec éventuellement un véhicule 4x4. Une fois installée la fibre devrait être très peu visible dans la Plaine des Sables (elle le sera uniquement dans le rempart de Piton des Basaltes) et pourrait être laissée en place un an pour une réitération de mesures. Nous envisageons de faire traverser la route à la fibre afin de prolonger la distance de mesure. Pour cela, nous nous coordonnerons avec les personnes en charge de l'entretien de la route pour installer un fourreau sous celle-ci.

**Mesures**
Dans un second temps nous effectuerons plusieurs campagnes de mesures. Les mesures s'effectueront depuis le relais de transmission de Piton des Basaltes et n'aura donc aucun impact sur la Plaine des Sables. Ces mesures permettent de transformer la fibre en une ligne continue de capteurs. Toucher la fibre durant ou hors mesure ne présentera aucun danger.
L'objectif est de faire plusieurs mesures, dans un contexte éruptif, dans un contexte calme et dès que des signes d'une possible réalimentation magmatique sont repérés par l'OVPF (sismicité profonde, inflation du volcan, augmentation du flux de $CO_2$). Cette activité précède parfois de plusieurs mois les crises sismiques sommitales annonciatrices des éruptions.

**Résultats attendus**
Le premier objectif est de détecter la sismicité de faible amplitude sous la Plaine des Sables en effectuant des mesures au plus près de celle-ci, et en utilisant la résolution de mesure élevée permise par les mesures sur fibre optique. Cette sismicité permettra de mettre en évidence l'activité liée aux mouvements de fluides induits par la réalimentation du volcan en magma.
Ces mesures permettront aussi une imagerie de la subsurface (quelques centaines de mètres) afin de mieux comprendre la formation de la Plaine des Sable à travers le temps.

**Références**
*Battaglia, J., V. Ferrazzini, T. Staudacher, K. Aki, JL. Cheminée (2005), Pre-eruptive migration of earthquakes at the Piton de la Fournaise volcano (Réunion Island), Geophysical Journal International, 161, 549–558. doi:10.1111/j.1365-246X.2005.02606.x.*

*Boudoire, G., M. Liuzzo, A. Di Muro, V. Ferrazzini, L. Michon, F. Grassa et al. (2017), Investigating the deepest part of a volcanoplumbingsystem:evidence for an active magma pathbelow the western flank of Piton de la Fournaise (La Réunion Island), Journal of Volcanology and Geothermal Research, 341, 193-207.*

*Duputel, Z., O. Lengliné, V. Ferrazzini (2019), Constraining Spatio temporal Characteristics of Magma Migration at Piton De La Fournaise Volcano From Pre-eruptive Seismicity, Geophys. Res. Lett., v. 46, 119-127. doi: 10.1029/2018GL080895.*

*Lengliné, O., Z. Duputel, V. Ferrazzini (2016), Uncovering the hidden signature of a magmatic recharge at Piton de la Fournaise volcano using small earthquakes, Geophys. Res. Lett. 43, 4255–4262. doi:10.1002/2016GL068383.*

*Michon, L., V. Ferrazzini, A. Di Muro, N. Villeneuve, V. Famin (2015), Rift zones and magma plumbing system of Piton de la Fournaise volcano: How do they differ from Hawaii and Etna?, Journal of Volcanology and Geothermal Research, 303, 112-129.*

*Peltier, A., V. Ferrazzini, A. Di Muro, P. Kowalski, N. Villeneuve, N. Richter et al. (2021), Volcano crisis management at Piton de la Fournaise (La Réunion) during the COVID-19 lockdown, Seismological Society of America, 92(1), 38-52.*

*Principe, C., A. Morandi, A. Di Muro, L Michon (2016), Volcanological Map of the Plaine Des Sables, Piton de La Fournaise. In Active Volcanoes of the Southwest IndianOcean, édité par Patrick Bachelery, Jean-François Lenat, Andrea Di Muro, et*

*Laurent Michon, 327-30. Active Volcanoes of the World. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-31395-0_20.*

*Zhan, Z. (2020), Distributed acoustic sensing turns fiber-optic cables into sensitive seismic antennas. Seismological Research Letters, 91(1), 1-15.*

## > Autres projets

. **Projet Université de Potsdam « Seismic Precursory Signals before Effusive Eruptions at La Réunion »**
Porteur du projet : Eva Eibl (Université de Potsdam)
Laboratoires impliqués : Université de Potsdam, IPGP

Ce projet a pour but l'installation d'un nouveau type de sismomètre compact « nouvelle génération » (appelé BlueSeis) fonctionnant avec une fibre optique et un réseau sismique composée de 7 stations sismiques tout autour dans un rayon de 400 m (stations satellites). L'installation sur le terrain se fera pour une durée de 4 ans. Cette configuration de réseau sismique permettra de mieux localiser les séismes et le trémor, et d'étudier l'emplacement et la géométrie des injections magmatiques du Piton de la Fournaise.
L'installation s'est faite sur un site existant (station CSS de l'OVPF ; cf. section 8) où se trouve déjà une station du réseau de surveillance du Piton de la Fournaise afin de bénéficier des équipements de transmission des données en temps réel.
Le sismomètre à fibre optique pourra ainsi être comparé à l'instrument déjà en place.

Ce nouveau type de capteur permet d'explorer les mouvements rotatifs du sol avec une technique novatrice basée sur des gyroscopes à fibre optique (FOG). Il permettra :
- l'analyse et l'étude des signaux sismiques précurseurs d'éruptions volcaniques générés par les mouvements de magmas en profondeur ;
- l'étude de la sismicité pour estimer la géométrie et la taille du corps magmatique en mouvement en profondeur ;
- l'étude des séismes et du passage au trémor volcanique lorsque le magma approche de la surface.

. **Dans le cadre de la convention signée entre le MTES et l'IPGP, concernant le programme 2018-2019 d'action de prévention des risques sismiques, volcaniques et gravitaires,** 3 forages seront instrumentés en 2023 en Guadeloupe. En collaboration avec les équipes de l'observatoire volcanologique et sismologique de Guadeloupe et de l'IPGP, l'équipe technique de l'OVPF conçoit l'assemblage et la mise en place de 5 capteurs qui seront installés dans ces forages.

## > Collaborations internationales d'échanges

**Échanges avec l'observatoire volcanologique d'Hawaii (Hawaii Volcano Observatory, HVO)**

Une collaboration contractualisée par une convention entre l'United States Geological Survey (USGS) et l'IPGP a permis le rapprochement de l'OVPF avec le Hawaii Volcano Observatory (HVO). Dans ce cadre, un échange bilatéral est susceptible d'avoir lieu chaque année avec l'accueil dans chacune des structures d'un chercheur ou d'un ingénieur pour travailler sur des problématiques scientifiques et techniques communes.

**Échanges avec l'observatoire volcanologique du Karthala (OVK, Grande Comore)**

Depuis 40 ans, l'Institut de Physique du Globe de Paris et l'Université de la Réunion collaborent avec le CNDRS pour l'étude et la surveillance des aléas telluriques aux Comores. La Convention Cadre (dernier avenant : 28/07/1998) signée entre le CNDRS, l'IPGP et l'Université de la Réunion définit les domaines de coopération et échange en matière de recherche, enseignement, formation du personnel, suivi et caractérisation des risques naturels aux Comores. Dans ce cadre, l'observatoire volcanologique du Piton de la Fournaise, l'observatoire volcanologique du Karthala (OVK) et le laboratoire Géosciences Réunion (LGSR) œuvrent

à l'amélioration continue des réseaux de mesure nécessaires au suivi de l'activité sismo-volcanique aux Comores et mènent des recherches conjointes pour caractériser les processus en œuvre et minimiser les effets des aléas telluriques.

Pour fortifier ce partenariat, un projet de programme Interreg a débuté en mars 2021 (cf. ci-dessus) et un protocole d'accord a été signé le 15 novembre 2021 entre l'IPGP et le CNDRS pour définir les actions de collaboration entre les deux instituts.

La collaboration entre les deux observatoires se poursuit donc et les moyens techniques mis en œuvre les années précédentes par l'OVPF et les méthodologies de télémaintenance permettent de maintenir l'OVK et son réseau de surveillance à l'état opérationnel.

L'utilisation des données de l'OVK dans le cadre du REVOSIMA confirme la nécessité de l'implication de l'OVPF-IPGP dans cette collaboration.

**Échanges avec l'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV, Italie)**

Depuis 2010, des collaborations techniques et scientifiques ont été mises en place entre l'INGV et l'OVPF-IPGP.

# 10. Sollicitations médiatiques et interventions grand public

## > Sollicitations médiatiques

Du fait du grand nombre de jours d'éruptions au Piton de la Fournaise en 2022, l'OVPF a fait l'objet une fois encore, d'une grande couverture médiatique tout au long de l'année, avec :
- de nombreuses (100aines) interventions dans les médias (TV, radio et presse écrite) locaux, nationaux (parmi lesquels TF1, France télévision, France inter) et internationaux lors des éruptions, avec jusqu'à plusieurs dizaines de sollicitations par jour en début d'éruption et des interventions quotidiennes tout le long des éruptions dans les médias locaux (parmi lesquels Antenne Réunion, Réunion Première TV, RTL Réunion, Réunion Première radio, Radio Freedom, Le Journal de l'Ile de la Réunion, Le Quotidien de la Réunion, Imaz Press et Zinfos974).

Aux interventions liées à l'actualité du Piton de la Fournaise se sont rajoutées :

- des interventions concernant l'activité sismo-volcanique à Mayotte et les missions de surveillance associées, parmi lesquelles :
. Canal + Réunion : « Notre monde » (diffusion 5 et 6 novembre 2022)

- des interventions concernant l'activité volcanique au Tonga (presse locale et JT TF1),

- de nombreuses sollicitations pour des reportages et des émissions grand public sur le volcanisme, le Piton de la Fournaise, ou l'observatoire, sur de grandes chaînes nationales et internationales, ou dans la presse écrite à grande audience parmi lesquelles :
. Le journal des enfants : « Plongez au cœur des volcans » (avril 2022)
. Magazine allemand TERRA
. France 5 : Échappées belles « Spéciale La Réunion, l'île des sens » (diffusion 12 novembre 2022)

## > Interventions grand public

### - Conférences grand public

Comme chaque année les membres de l'OVPF ont participé au cycle de conférences organisé par la Cité du volcan, mais aussi au cycle de conférence grand public du centenaire de l'IPGP ainsi qu'à la manifestation « Jours de feu » organisée par la commune de Sainte-Rose et l'office de tourisme de l'Est (2-4 septembre 2022).

En 2022, quatre conférences grand public ont ainsi été animées par des membres de l'OVPF :

. 16/04/2022 (Cité du Volcan) – *Cendres et gaz du volcan Hunga Tonga dans le ciel de La Réunion* – Alexandre Baron (LACy – université de La Réunion et Andrea Di Muro (OVPF)
. 14/06/2022 (IPGP – Paris) – *Au chevet des volcans* – Aline Peltier (OVPF), Edouard Kaminski (IPGP) et Jean-Christophe Komorowski (IPGP)
. 04/09/2022 (Jours de Feu) – *Compte Rendu de la saison volcanique 2022* – Philippe Kowalski (OVPF)
. 04/10/2022 (Cité du Volcan – Conférence de presse – *L'éruption du 19 septembre 2022* – Bhavani Bénard, Zacharie Duputel, Aline Peltier (OVPF) et Nicolas Villeneuve (LGSR, Université de La Réunion, OVPF)

### - Fête de la science (10 au 27 novembre 2022)

Dans le cadre de la Fête de la Science, les membres de l'OVPF sont intervenus pour un volume horaire de 26 heures dans l'auditorium de la Cité du Volcan sous forme de mini conférences pour les classes de niveau primaire et collège, pour présenter le fonctionnement des volcans, le métier de volcanologue ou encore les techniques de surveillance de l'observatoire volcanologique.

Cette année, Aline Peltier (directrice de l'OVPF) a été nommée Ambassadrice de la fête de la science à La Réunion, dont le rôle est de promouvoir et de donner de la visibilité à cet événement pour renforcer notamment les relations entre science et société.

A ce titre, elle a participé à l'inauguration de la fête de la Science et du village « Réveil climatique » à la Cité du volcan le 10 novembre 2022 (Figure 87) ainsi qu'à diverses animations et représentations au travers l'île.

*Figure 87 : Inauguration de la Fête de la Science de La Réunion le 10 novembre 2022 à La Cité du Volcan, et mini-conférence de l'OVPF (en bas à droite) pour les primaires-collèges dans l'auditorium de la Cité du Volcan dans le cadre de la Fête de la Science 2022.*

- Journées « Femmes et Sciences »

Les femmes de l'OVPF sont très impliquées dans la promotion et la valorisation des femmes en sciences. Ainsi en 2022, elles ont participé en tant que « marraines » à plusieurs événements centrés sur ce thème (Figure 88) :

. 11/11/2022 - dans le cadre de la Fête de la Science, participation à une table ronde « *Femmes en Sciences* » au Musée Stella Matutina sur la place des femmes dans les sciences, échanges avec le public – Aline Peltier (OVPF)
. 26/11/2022 – participation à la matinée « *Sciences au féminin* » organisée par le lycée Pierre Lagourgue du Tampon pour faire connaître les métiers scientifiques et échanger avec les lycéen(nes) – Lise Retailleau (OVPF)

*Figure 88 : Participation de l'OVPF (à gauche) à la table ronde « Femmes en Sciences » au musée Stella Matutina et (à droite) à la matinée « Sciences au féminin » au lycée Pierre Lagourgue du Tampon.*

- Interventions auprès des scolaires

La Cité du volcan accueille chaque année des élèves de la circonscription du Tampon 2 dans le cadre d'une manifestation culturelle et scientifique « *Scienc'aMusée* ». Dans ce cadre les membres de l'OVPF sont intervenus pour un volume horaire de 8,5 heures dans l'auditorium de la Cité du Volcan sous forme de mini conférences pour sensibiliser et éveiller les jeunes élèves aux métiers de l'observatoire.

A cet événement se sont ajoutés des sollicitations ponctuelles avec :
. Interventions dans les écoles primaires (2 en métropole, Joinville le Pont et Marsannay la Côte) pour présenter le fonctionnement des volcans et le métier de volcanologue.
. Interventions dans des classes de collège et de primaire dans le cadre du projet Hatari et du jumelage de classes entre des établissements scolaires de la commune de Sainte-Rose (La Réunion) et Singani (Grande Comore) en lien avec l'éruption de 1977 ; en classe et sur le terrain, et avec une restitution finale dans le futur centre d'interprétation du volcanisme littoral de Sainte-Rose (Figure 89).

*Figure 89 : Intervention de l'OVPF dans des classes de collège et de primaire dans le cadre du projet Hatari et du jumelage de classes entre des établissements scolaires de la commune de Sainte-Rose (La Réunion) et Singani (Grande Comore).*

- Interventions autres

A cela s'ajoute la participation de l'OVPF à la journée d'acculturation de la gendarmerie et à la journée d'acculturation aux risques naturels majeurs de l'éducation nationale :
. 15/09/2022 - *Le Piton de la Fournaise : les risques associés, les mesures préventives et la gestion de crise* - Aline Peltier
. 24/11/2022 - *Le risque volcanique à La Réunion – Aline Peltier*
- *Le risque sismique à La Réunion – Zacharie Duputel*

Enfin l'OVPF reste très impliqué dans les projets :

. **« Paré Pas Paré »** piloté par la PIROI (Plate-forme d'Intervention Régionale de l'Océan Indien) de la Croix Rouge Française, sur la sensibilisation des plus jeunes (niveau écoles primaires) aux risques naturels à La Réunion,

. **« Sismos à l'école »**, qui est une opération de prêt de matériel de sismologie aux établissements scolaires permettant la réalisation de projets pédagogiques avec les élèves. Des formations permettent aux professeurs impliqués d'acquérir la maîtrise du matériel prêté. Ce plan s'adresse aux enseignants et aux élèves de collèges et de lycées, voies générale, technologique et professionnelle, ainsi qu'aux élèves de classes préparatoires.

## > Réseaux sociaux et site web

L'OVPF dispose d'un compte Twitter et Facebook. Ces comptes sont consultables aux adresses suivantes :
. https://twitter.com/obsfournaise
. https://www.facebook.com/ObsVolcanoPitonFournaise/

Les réseaux Twitter et Facebook de l'OVPF comptent respectivement 6727 et 30 925 abonnés (chiffres janvier 2023). Ces chiffres sont en augmentation de 16% et 11,5% respectivement pour Twitter et Facebook par rapport à 2021.
La moyenne des portées des publications Facebook est d'environ 50 000 interactions, avec des pics à plus de 500 000 lors des débuts d'éruption.

Ces réseaux sociaux viennent compléter la page actualité de l'OVPF où les images des webcams de l'observatoire sont diffusées en direct et où les bulletins d'activité sont régulièrement mis en ligne. L'OVPF émet quotidiennement un bulletin d'activité relatif aux observations de la veille.
. https://www.ipgp.fr/observation/ovs/ovpf/
. https://www.ipgp.fr/volcanoweb/reunion/Bulletin_quotidien/bulletin.html

En phase éruptive des bulletins détaillés viennent compléter ces bulletins automatiques. Sauf problème technique, la fréquence d'émission des bulletins détaillés de l'observatoire pendant les éruptions est quotidienne. En phase non éruptive, en l'absence de changement majeur dans l'activité ou dans les signaux enregistrés, la fréquence d'émission des bulletins détaillés de l'observatoire est mensuelle :
. https://www.ipgp.fr/observation/ovs/ovpf/
. https://www.ipgp.fr/communiques-et-bulletins-de-lobservatoire/

A noter que depuis juin 2018, les bulletins mensuels sont également consultables en anglais.

Enfin, en collaboration avec l'IRT (Ile de la Réunion Tourisme, Région Réunion), l'OVPF maintient une webcam qui permet au grand public d'accéder à des vidéos full HD du volcan en temps réel, consultable sur ce lien :
. https://www.reunion.fr/organisez/webcams/webcam-volcan-piton-de-la-fournaise/

## 11. Implications de l'OVPF dans le suivi de l'activité à Mayotte

En mai 2018, une activité sismique a commencé à affecter l'île de Mayotte, avec de nombreux séismes ressentis par les habitants. Une importante mobilisation interministérielle et scientifique a été mise en place pour comprendre ce phénomène nouveau et mettre en place les mesures d'anticipation adaptées. En mai 2019, une campagne océanographique (MD220-MAYOBS1) sur le Marion Dufresne a permis la découverte d'un nouveau site éruptif sous-marin (désormais baptisé Fani Maoré) à 50 km à l'est de Mayotte qui a formé un édifice d'au moins 800 m de hauteur sur le plancher océanique situé à 3500 m sous la surface.

En réponse à cette crise sismo-volcanique au large de Mayotte, un travail collégial a été fourni par l'IPGP et les autres instituts impliqués (CNRS, BRGM, Ifremer…) pour organiser la réponse scientifique et opérationnelle à cette crise et, dans le cadre de réunions de travail interministérielles, pour faire des propositions concrètes d'actions prioritaires à mener à la fois en recherche et en surveillance sur le court, moyen et long terme. Le projet de création du Réseau de surveillance volcanologique et sismologique de Mayotte (REVOSIMA) a ainsi été présenté le 4 juin 2019 aux ministères impliqués (ministère des Outre-mer, ministère de l'Intérieur, ministère de l'Enseignement supérieur, de la Recherche et de l'Innovation et ministère de la Transition écologique et solidaire).

Le 18 juin 2019, le cabinet du Premier Ministre a validé :

a) la mise en place d'un comité scientifique et technique de suivi de crise ;
b) la création du Réseau de surveillance volcanologique et sismologique de Mayotte – REVOSIMA) à Mayotte avec la mise en place d'un suivi de l'activité volcanologique et sismologique en temps réel et en continu ;
c) la mise en place d'actions scientifiques spécifiques pour :
1- suivre la dynamique sismo-éruptive à terre et en mer, en particulier en lien avec des campagnes en mer et l'instrumentation sous-marine afin de suivre la possible migration de la sismicité et du volcanisme,
2- suivre la déformation et la submersion marine,
3- caractériser et suivre les instabilités gravitaires et l'aléa tsunami,
4- améliorer la connaissance de la tectonique et du contexte géodynamique de Mayotte,
5- assurer le suivi de la géochimie des fluides volcaniques.

La mission de surveillance de cette zone volcanique a été confiée par le cabinet du Premier Ministre et les ministères concernés à l'IPGP, afin qu'il mette en place ce Réseau de surveillance volcanologique et sismologique de Mayotte (REVOSIMA). Ce réseau est opéré par l'IPGP avec le soutien du BRGM et est sous la responsabilité de l'observatoire volcanologique du Piton de la Fournaise et de la direction régionale du BRGM à Mayotte. Les données de ce réseau de surveillance sont produites par un large consortium de partenaires scientifiques français (IPGP et Université Paris Cité, BRGM, IFREMER, CNRS, BCSF-RéNaSS, ITES et Université de Strasbourg, IGN, ENS, SHOM, TAAF, Météo France, CNES, Université Grenoble Alpes et ISTerre, Université Clermont Auvergne, LMV et OPGC, Université de La Réunion, Université Paul Sabatier, Toulouse et GET-OMP, Université de la Rochelle, Université de Bretagne Occidentale, IRD et collaborateurs) et financé par l'État (Ministère de l'enseignement supérieur, de la recherche et de l'innovation, Ministère de la Transition écologique et solidaire, Ministère de l'intérieur, Ministère des Outre-mer).
Les données sismiques et GNSS sont distribuées par l'IPGP (volobsis.ipgp.fr), RESIF, le RENASS, le RGP et ont le soutien du Service national d'observation en volcanologie (SNOV-INSU).

En 2019, le REVOSIMA a fonctionné en phase d'intérim (REVOSIMA-1), en faisant appel à un soutien de personnels scientifiques provenant de laboratoires de l'INSU-CNRS et de leurs universités associées (BCSF-RENASS, CNRS, ITES et Université de Strasbourg, Université Grenoble Alpes et ISTerre, Université Paul Sabatier, Toulouse et GET-OMP, Université Clermont Auvergne et OPGC, BRGM, IPGP et Université de Paris, Université de la Réunion), sous le pilotage de l'IPGP, de l'OVPF-IPGP et du BRGM Mayotte ; et sur la base d'un protocole et d'outils mis en place par l'IPGP, le BCSF-RENASS, l'OVPF-IPGP et l'IFREMER. Avec ses partenaires du REVOSIMA, les équipes des observatoires volcanologiques et sismologiques de l'IPGP ont développé les outils et continuent le renforcement des réseaux de capteurs pour le suivi de l'activité de Mayotte.

Depuis le 1er février 2020, ce réseau est opéré par l'OVPF-IPGP. Ainsi,
- la direction de l'OVPF-IPGP a un rôle de coordination à l'échelle nationale avec les scientifiques de différents instituts nationaux impliqués dans le REVOSIMA, notamment lors des réunions hebdomadaires du comité scientifique et technique du REVOSIMA ;

- les protocoles et routines en place à l'OVPF pour la surveillance du Piton de la Fournaise ont ainsi été étendus aux données du réseau en place à Mayotte ;
- les astreintes concernant le REVOSIMA ont été mutualisées à celles de l'OVPF ;
- un protocole a été mis en place avec les différents partenaires, notamment le BRGM de Mayotte et les préfectures de Mayotte et de La Réunion (le préfet de La Réunion est le Préfet de la zone de défense du sud de l'océan Indien) en cas de séisme ressenti afin de pouvoir rapidement publier une carte de localisation et de magnitude. Ce même protocole sera activé en cas de changement notable d'activité (déformation, sismicité, dégazage ou activité volcanique) ;
- la gestion des stations à terre se fait par l'équipe technique de l'OVPF, en étroite collaboration avec le BRGM de Mayotte ;
- un bulletin mensuel sur l'activité sismo-volcanique à Mayotte est rédigé et publié en début de chaque mois (disponible sur ce lien : *http://www.ipgp.fr/fr/revosima/actualites-reseau*) ;
- en complément et sur le même format que les bulletins d'activité quotidiens concernant l'activité du Piton de la Fournaise, un bulletin semi-automatique préliminaire d'activité relatif aux activités de la veille et validé par un.e analyste, a été développé et mis en place.
Il est publié quotidiennement et accessible directement sur ce lien : *http://volcano.ipgp.fr/mayotte/Bulletin_quotidien/bulletin.html*.

## > Surveillance H24 de l'activité sismo-volcanique de Mayotte

Les protocoles, routines et astreintes mutualisés avec ceux existants pour le Piton de la Fournaise permettent le suivi opérationnel de l'activité sismo-volcanique de Mayotte grâce aux réseaux permanents de stations de surveillance à terre (Figures 90 et 91).

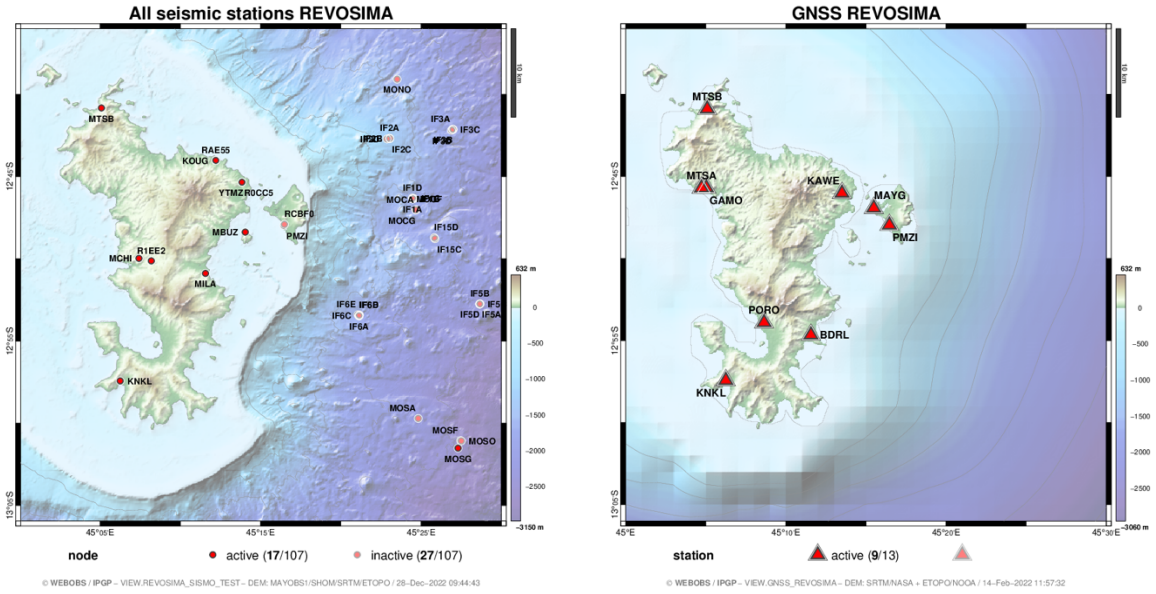

*Figure 90 : Cartes de localisation (à gauche) des sismomètres et (à droite) des stations GNSS à Mayotte.*

Ces réseaux comprennent pour la surveillance opérationnelle :
- 11 stations sismiques dont 3 RaspberryShake gérés par l'ITES-Strasbourg, 1 appartenant au réseau accélérométrique permanent (RAP), 1 issue d'un projet « sismos à l'école » (Figure 90),
- 9 stations GNSS sur Mayotte (Figure 90) et 1 à Grande Glorieuse. Ces stations sont gérées par l'OVPF et différents partenaires (EXAGONE, Précision Topo, CNES),
- 1 station de mesure de $CO_2$ dans le sol (Figure 91).

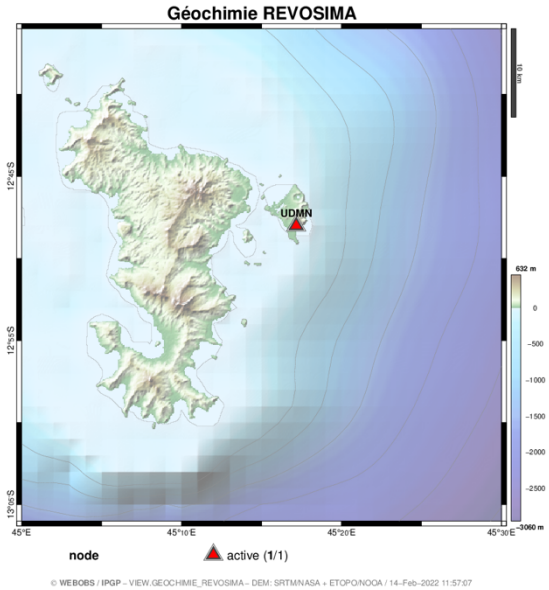


*Figure 91 : Carte de localisation de la station UDMN $CO_2$ sol à Mayotte.*

Sur toutes ces stations 7 sont ainsi gérées par l'OVPF dans le cadre du REVOSIMA :
- GGLO (Ile de Glorieuse) : sismomètre et GNSS
- KNKL (Kani-Kéli, Grande Terre) : sismomètre et GNSS
- KOUG (Koungou, Grande Terre) : sismomètre
- MBUZ (Ilôt Mbouzi) : sismomètre
- MTSB (Mtasmaboro, Grande Terre) : sismomètre et GNSS
- PMZI (Pamandzi, Petite Terre) : sismomètre et GNSS
- UDMN (Usine de dessalement, Petite Terre) : $CO_2$

Pour ces stations, l'équipe technique de l'OVPF assure :
- l'installation des stations à terre opérées par l'observatoire,
- la maintenance des stations en collaboration avec le BRGM-Mayotte,
- la transmission des données en temps réels,
- le traitement, la sauvegarde et la distribution des données.

Pour l'année 2022 il y a eu 51 opérations de maintenance/installation réalisées avec le concours du BRGM de Mayotte.

*Réseau Petite Terre*
- KNKL : modification des paramètres du récepteur GNSS, remplacement de la solution de transmission par une solution Mikrotik, remplacement de la batterie.
- KOUG : mise à jour logiciel des équipements et action corrective sur la transmission.
- MTSB : remplacement du numériseur sismique et mise à jour logiciel, modification des paramètres du récepteur GNSS, remplacement de la solution de transmission par une solution Mikrotik et action corrective software de la transmission Mikrotik.

*Réseau Grande Terre*
- PMZI : remplacement du numériseur sismique et mise à jour logiciel, modification des paramètres du récepteur GNSS, action corrective software de la transmission Mikrotik.
- UDMN : action corrective software de la transmission Mikrotik, réglage chargeur, maintenance de la station $CO_2$ (pompe, filtre, électrovanne et captage).

*GLOR*
Modification des paramètres du récepteur GNSS.

- *MBUZ*

Installation d'une station sismique sur l'ilot Mbouzi et action corrective software de la transmission Mikrotik (Figure 92).

*Figure 92 : Station sismique MBUZ sur l'ilôt Mbouzi.*

Plusieurs stations sismiques de test (12 nodes SmartSolo) ont été déployées sur Mayotte pour déplacer les stations KNKL, MTSB et PMZI qui sont trop bruitées. Les données sont en cours d'analyse.

Des tests au centre de Grande Terre, à Combani, a permis de valider un site. Une station sismique y sera installée courant 2023.

- Lac Dziani

Un projet d'installation d'une station de surveillance des dégagements gazeux et du bullage du lac Dziani à Petite Terre est prévu pour juin 2023. L'équipe technique de l'OVPF porte l'étude, la conception et la réalisation de la plateforme multi-paramètres. La plateforme sera composée de cubes flottants sur lesquels seront disposés des panneaux solaires et des batteries pour assurer l'autonomie en énergie, une solution pour l'acquisition des données, une solution 4G pour la transmission des données, et l'installation de différents capteurs : $O_2$, salinomètre, thermistances, station météo, et camera haute définition.

Pour 2023 il est prévu également les actions suivantes sur les stations :
. Pérenniser l'installation de MTSBG et KNKLG.
. Installation d'une station sismique à Combani.
. Remplacer les stations sismiques de MTSBS, KNKLS et PMZIS si les sites sont validés.
. Préparer la réalisation d'un forage instrumenté à Petite Terre.
. GGLO (Grande Glorieuse) remplacement de la transmission satellite par les TAAF et installation des solutions de télémaintenance.

## - Activité sismique en 2022

Dans le cadre du suivi de la sismicité à Mayotte, les membres de l'observatoire identifient quotidiennement les événements qui apparaissent sur les stations sismologiques installées sur l'île (Figure 90). Les différents types d'activité (VT : volcano-tectonique, LP : longue période, VLP : Très longue période) sont un indicateur de l'activité volcanique et magmatique au cours du temps.

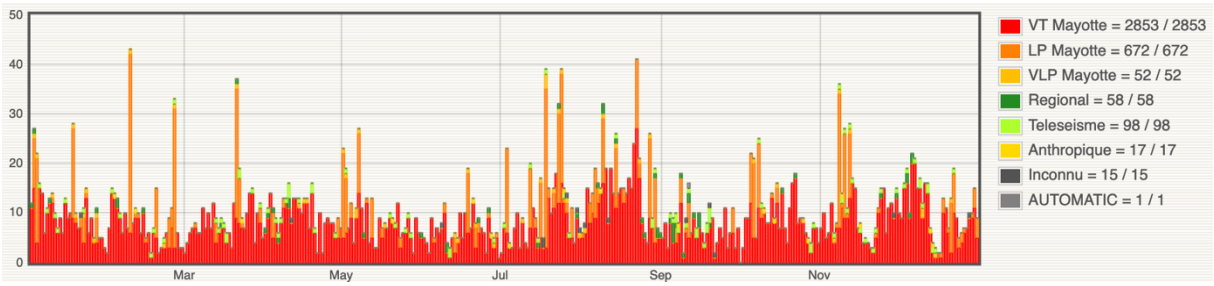


*Figure 93 : Histogramme de la sismicité journalière à Mayotte en 2022.*

L'activité sismique 2022 à Mayotte a été relativement stable avec de légères fluctuations au cours de l'année avec une moyenne de 8 VT par jour (Figure 93).

Un séisme a été ressenti sur l'île le 14 avril 2022, séisme de magnitude 4.1 localisé à 30 km à l'est de Dzaoudzi et à 46 km de profondeur. L'OVPF, en association avec le BRGM de Mayotte, applique à chacun d'eux un protocole permettant d'informer les autorités, ainsi que la population avec la diffusion d'un bulletin exceptionnel.

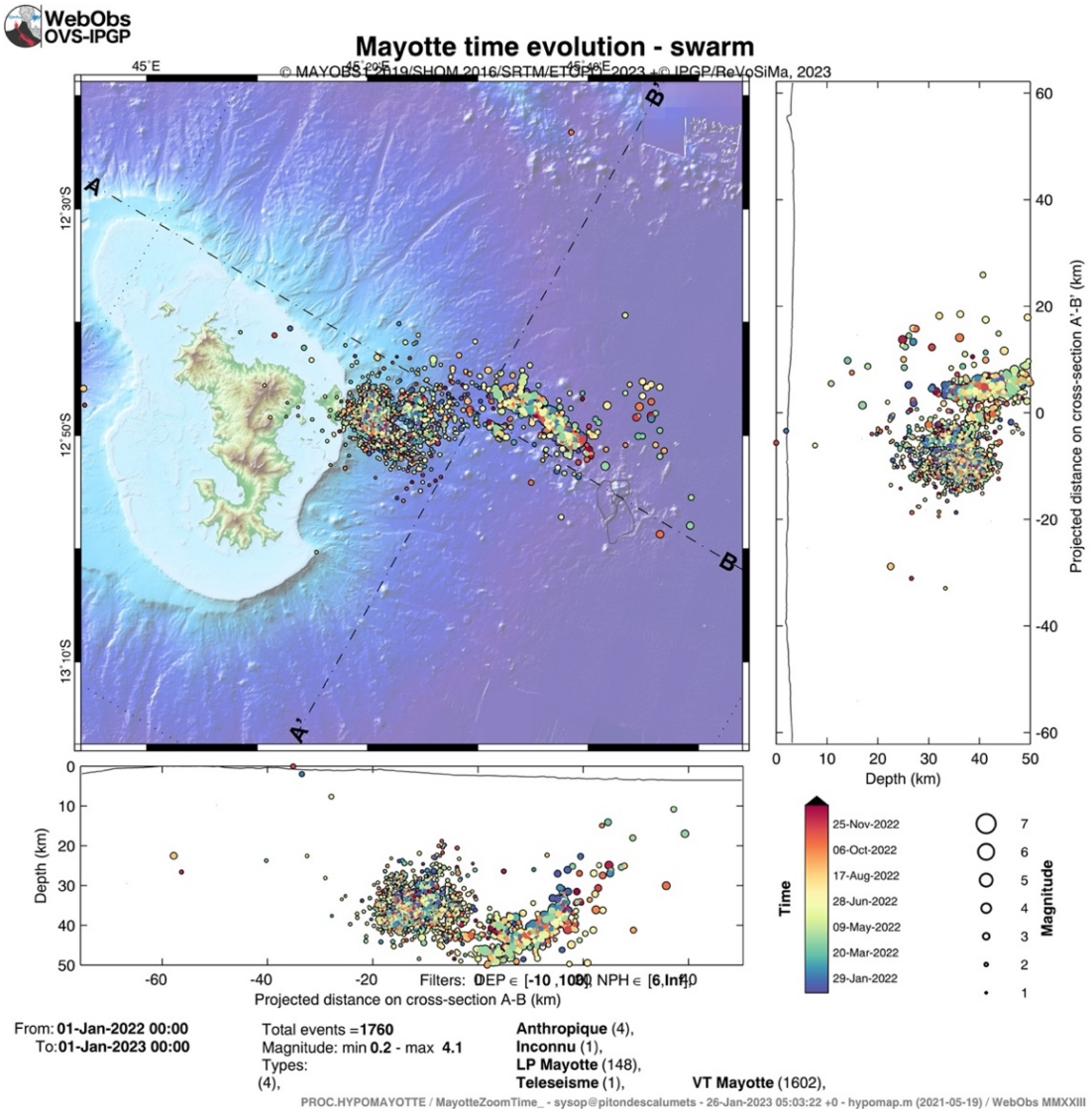


*Figure 94 : Carte des épicentres (± 5 km) des séismes localisés avec les réseaux sismiques à terre (IPGP-IFREMER-CNRS-BRGM-BCSF-RéNaSS, ITES) en 2022 (échelle temporelle de couleur). Sont aussi représentées une projection des hypocentres des séismes le long de coupes transverses et axiales le long de la ride montrant la localisation estimée en profondeur (la précision varie entre +-5 km et +-15 km) des séismes en fonction de la magnitude (taille des symboles et de la date (échelle temporelle de couleur). La localisation approximative des panaches acoustiques identifiés pendant les campagnes océanographiques (MD220-MAYOBS1, MD221-MAYOBS2, MD222-MAYOBS3, MD223-MAYOBS4, MAYOBS15) et dont la nature hydrothermale et/ou magmatique reste à préciser, est indiquée par des triangles jaunes, l'étoile rouge indique le site éruptif nouvellement identifié le 16 mai 2019, l'étoile orange la zone des coulées émises entre le 18/05/2019 et le 17/06/2019 et l'étoile jaune la zone des coulées émises entre juillet 2019 et le 20/10/2020. Les stations sismiques du réseau terrestre, les sismomètres fond de mer (OBS) et les stations de positionnement par satellite GPS sont indiquées par des symboles (voir légende). (©OVPF-IPGP, BRGM, IFREMER, CNRS, BCSF-RéNaSS, ITES / REVOSIMA).*

La localisation manuelle des séismes détectés automatiquement est effectuée par un groupe composé de 10 agents de l'IPGP (8 basés à l'OVPF et 1 basé à Paris) et un agent du BRGM Mayotte. Ces séismes forment deux essaims avec des épicentres regroupés en mer, entre 5 et 15 km à l'est de Petite-Terre pour l'essaim sismique proximal (le plus proche de Petite-Terre, nommé précédemment essaim principal), et à 25 km à l'est de Petite-Terre pour l'essaim sismique distal (le plus éloigné de Petite-Terre et qui s'étend le long de l'alignement de cônes volcaniques jusqu'au site éruptif, nommé précédemment essaim secondaire), à des profondeurs comprises majoritairement entre 25 et 50 km (Figure 94).

Enfin, le groupe « sismologie » du REVOSIMA s'est réuni afin d'analyser ensemble la relocalisation de la sismicité en ajoutant les données des stations OBS (sismomètres fond de mer qui sont remontées tous les 6 mois environ). Ces événements, appelés pickathon, sont réalisés en présentiel ou en distanciel et ont pour but de compléter les catalogues construits au jour le jour à partir des seuls enregistrements continus des stations à Terre. Ce pickathon a montré que la relocalisation automatique utilisée à l'observatoire depuis 2021 est aussi valide pour l'analyse des données OBS.

A noter que la nouvelle station installée sur l'ilot Mbouzi en mars 2022 (Figure 92), à distance de l'activité humaine, enregistre des données de très bonne qualité et permet d'observer des événements de plus faible amplitude.

- Déformation en 2022

Les mesures de déformation indiquent depuis le mois de juillet 2018 (Lemoine et al., 2020 ; Feuillet et al., 2021) un déplacement d'ensemble de l'île vers l'est et un affaissement. En cumulé depuis le 1er juillet 2018, ces déplacements horizontaux sont d'environ 21 à 25 cm vers l'est et l'affaissement (subsidence) d'environ 10 à 19 cm suivant les sites (Figure 95). A noter que vers avril-mai 2019, un premier ralentissement des déplacements a été observé. Depuis 2020 les déplacements ont de nouveau ralenti et depuis mars 2020 la subsidence est devenue négligeable sur certaines stations GPS. Enfin depuis fin 2020, il n'y a plus de cohérence dans les signaux de déformation qui sont devenues trop faibles et qui ne sortent pas du bruit ; il n'y a plus de signaux interprétables sans équivoque.

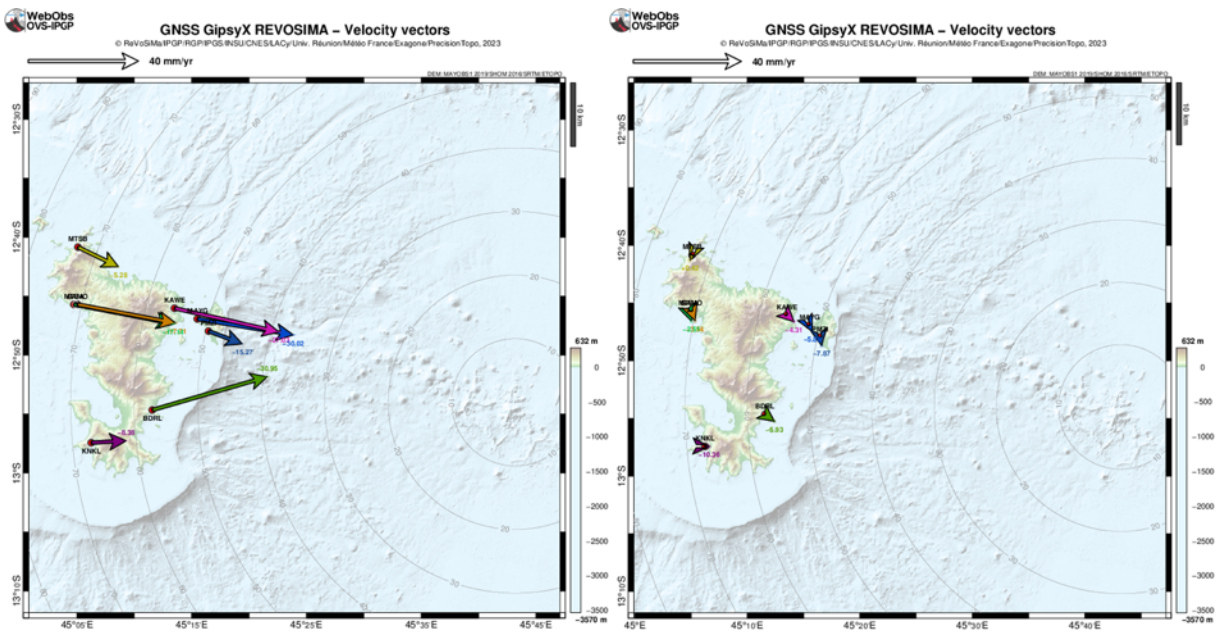


*Figure 95 : Déplacements du sol enregistrés sur les stations GPS de Mayotte entre le 1er juillet 2018 et le 31 décembre 2022 (à gauche) et en 2022 (à droite). Les déplacements horizontaux sont représentés sous forme vectorielle et les déplacements verticaux sont indiqués par les valeurs chiffrées en couleur. Post-traitement de ces données réalisé par l'IPGP (©OVPF-IPGP / REVOSIMA).*

Compte tenu des faibles déplacements actuels, les données sont de plus en plus influencées par des effets de charges de surface induites par l'hydrologie et la dynamique atmosphérique à grande échelle. La modélisation des déformations horizontales et

verticales sur la période 2002-2018, basée sur les données mensuelles issues de la mission gravimétrique GRACE (calcul IGN ; Chanard et al., 2018) montrent des fluctuations de l'ordre de 2 mm en horizontal et de l'ordre de 1 cm en vertical pic à pic sur des périodes de 12, 6 et 3 mois). Par conséquent, les fluctuations des déplacements actuels sur ces échelles de temps doivent être interprétées avec prudence.
Des calculs automatiques et journaliers ont été mis en place à l'IPGP (via les logiciels GipsyX et WebObs ; Beauducel et al., 2010 ; 2020) afin de suivre ces déplacements et de modéliser une source de déformation en temps-réel (Beauducel et al., 2014 ; 2020 ; Peltier et al., 2022). Les caractéristiques d'une source unique (localisation, profondeur et variation de volume), ajustant au mieux les observations sur une période de temps considérée, sont modélisées par un point source de pression isotrope en profondeur, dans un milieu homogène et élastique. Ces modèles simples restent les plus adaptés actuellement, compte-tenu des limitations engendrées par la géométrie actuelle du réseau de mesures géodésiques (bulletins mensuels REVOSIMA 2019 et 2020). Mais le faible taux de déformation actuel ne permet plus de modéliser de manière suffisamment fiable une source de déflation associée à un débit.

### - Flux de $CO_2$ dans le sol en 2022

Depuis son installation en novembre 2020, la station $CO_2$ UDMN installée au sein de l'usine de dessalement de Petite Terre a fonctionné presque en continu, bien qu'ayant connu des pannes en novembre 2020, en mai et décembre 2021 et en octobre 2022. Depuis fin 2020, une diminution progressive et ensuite une stabilisation des émissions de $CO_2$ par le sol est mesurée (Figure 96). L'évolution cyclique annuelle des émissions de $CO_2$ du sol est principalement contrôlée par l'évolution saisonnière des paramètres environnementaux. La variabilité des concentrations en $CO_2$ détectées dans l'air est contrôlée par la variabilité de l'apport biogénique.

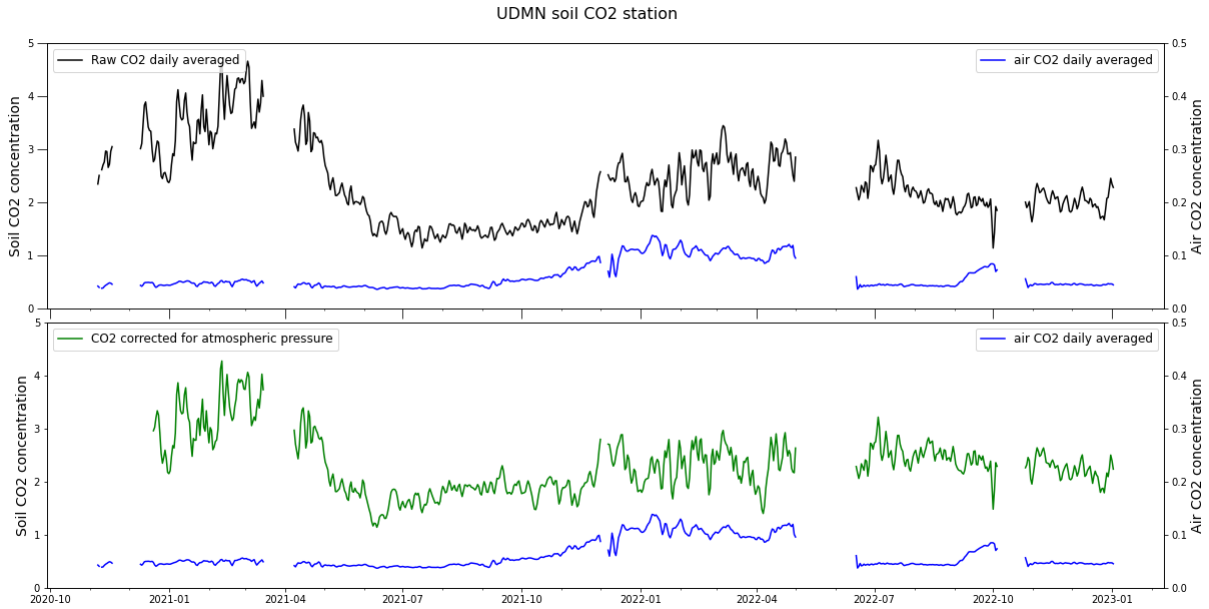


*Figure 96 : Évolution annuelle des concentrations en $CO_2$ dans le sol (vert) et dans l'air (bleu) au niveau de la station UDMN (Petite Terre).*

Sur la plage de l'aéroport et au niveau du lac Dziani, du gaz riche en $CO_2$ d'origine magmatique remonte à la surface sous forme de bullages. En novembre 2022, un suivi par imagerie drone de ces zones de bullages a été initié dans l'objectif d'obtenir une cartographie fine et de suivre leur évolution temporelle.

## > Campagnes en mer

En 2022, le personnel de l'OVPF a participé aux campagnes en mer réalisées dans le cadre du REVOSIMA.

Participation aux mission en mer suivantes :

- **MAYOBS22 (6-12 mars 2022, Osiris II)** : deux ingénieurs et un assistant ingénieur.
  Récupération des 6 OBS (sismomètres fond de mer) déployés lors de la mission précédente (Figure 97).
  Extraction des données brutes et conversion des données.
  Reconditionnement : remplacement de l'ensemble des batteries datalogger et largeur acoustique et réparations diverses.
  Redéploiement par chute libre et relocalisation acoustique des 6 OBS.

- **MAYOBS23 (8 au 24 juillet 2022, Marion Dufresne)**: un ingénieur et une chercheuse.
  Récupération des 6 OBS déployés lors de la mission précédente.
  Extraction des données brutes et conversion des données.
  Reconditionnement des 6 OBS et préparation des 2 nouveaux BBOBS (Broad Band OBS).
  Redéploiement par câble et localisation via le système BUC.
  Participation aux quarts.
  Animation d'ateliers d'introduction à l'identification des séismes auprès des étudiants de l'école bleue Outre-mer présents sur le bateau.

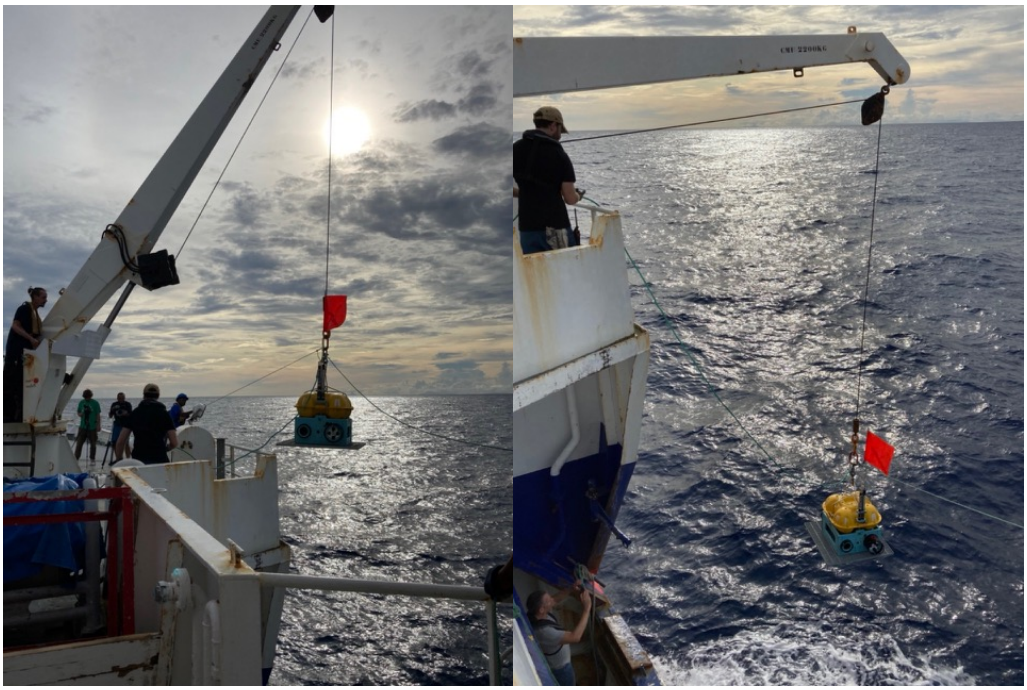

*Figure 97 : Récupération d'OBS lors de la campagne MAYOBS22.*

En parallèle aux campagnes en mer, participation de 4 personnels de l'OVPF à la formation « OBS broadband » (21-22 juin 2022) :
Formation sur la mise en œuvre des OBS large bande : assemblage mécanique, initialisation et mise en œuvre du sismomètre externe.
Mise en test avant déploiement pour la prochaine mission, extraction et vérification de la conformité des signaux.
Rectification du colisage du matériel utilisé en mission.

**Observations majeures réalisées lors des campagnes 2022** : la campagne en mer de surveillance MAYOBS23 (du 09 au 22 juillet 2022) montrent qu'aucune évolution morphologique majeure n'a été mise en évidence dans la zone du volcan Fani Maoré ou dans la zone du Fer à Cheval (structure préexistante à Fani Maoré située à l'aplomb de l'essaim sismique proximal) en 2022. En revanche, un nouveau panache acoustique a été découvert. Au total, 22 sites actifs sont désormais identifiés dans la zone du Fer à Cheval en date du 22/07/2022, avec 4 sites actifs en dehors, deux au nord-ouest, un à l'est et un au sud du Fer à Cheval. Ces panaches acoustiques sont des anomalies géochimiques détectés dans la colonne d'eau.

Toute l'actualité du REVOSIMA est à retrouver sur le site web et les réseaux sociaux du REVOSIMA :
*http://www.ipgp.fr/fr/revosima/actualites-reseau*
*https://www.facebook.com/ReseauVolcanoSismoMayotte/*
*https://mobile.twitter.com/revosima_*

***Références :***

*Beauducel et al. (2010), Recent advances in the Lesser Antilles observatories Part 2: WebObs - an integrated web-based system for monitoring and networks management, Paper presented at the European Geophysical Union General Assembly, Vienna, May 2010.*

*Beauducel et al. (2014), Real-time source deformation modeling through GNSS permanent stations at Merapi volcano (Indonesia), AGU Fall Meeting, December 2014, San Francisco, poster V412B-4800.*

*Beauducel, F. et al. (2020), WebObs: The volcano observatories missing link between research and real-time monitoring, Front. Earth Sci. | doi: 10.3389/feart.2020.00048.*

*Chanard, K. et al. (2018), Toward a global horizontaland vertical elastic load deformation model derived from GRACE and GNSS station position time series. Journal of Geophysical Research: Solid Earth,123, 3225–3237.https://doi.org/10.1002/2017JB015245.*

*Feuillet et al., Birth of a large volcano offshore Mayotte through lithosphere-scale rifting, Nature Geosciences, August 2021, https://doi.org/10.1038/s41561-021-00809-x.*

*Lemoine et al. (2020), The 2018–2019 seismo-volcanic crisis east of Mayotte, Comoros islands: seismicity and ground deformation markers of an exceptional submarine eruption, Geophys. J. Int., 223(1), 22–44, https://doi.org/10.1093/gji/ggaa273.*

*Peltier, A., S. Saur, V. Ballu, F. Beauducel, P. Briole, K. Chanard, D. Dausse, JB. De Chabalier, R. Grandin, P. Rouffiac, YT. Tranchant, M. Bès de Berc, S. Besançon, P. Boissier, C. Broucke, C. Brunet, K. Canjamalé, E. Carme, P. Catherine, A. Colombain, W. Crawford, R. Daniel, G. Dectot, N. Desfete, C. Doubre, T. Dumouch, C. Griot, M. Grunberg, H. Jund, P. Kowalski, F. Lauret, J. Lebreton, F. Pesqueira, F. Tronel, P. Valty, J. van der Woerd (2022), Ground deformation monitoring of the eruption offshore Mayotte, Comptes Rendus. Géoscience, pp. 1-23. https://doi.org/10.5802/crgeos.176.*

## > Projet MARMOR

MARMOR*, Marine Advanced geophysical Research equipment and Mayotte multidisciplinary Observatory for research and Response*, est un projet ANR PIA3 Equipex + qui a été approuvé en 2021 avec un financement à la hauteur de 15,4 ME. Il porte sur « *l'Équipement géophysique de recherche marine avancée et observatoire multidisciplinaire pour la recherche et la surveillance à Mayotte* ». L'Ifremer porte le projet avec un large partenariat dont font partie comme partenaires principaux CNRS, IPGP, IRD, BRGM, ESEO, OCA, ainsi que les universités de Bretagne Occidentale (UBO), de Nice Côte d'Azur (UCA), de La Rochelle (LRU), et de Grenoble-Alpes (UGA). MARMOR a l'objectif de doter, sur une échelle temporelle de 8 ans, la communauté scientifique française de l'équipement mobile et câblé nécessaire pour faire progresser l'étude de la déformation du sol, de la sismicité, des tsunamis, du volcanisme et de plusieurs problèmes environnementaux clés dans les zones océaniques et côtières, en étendant les capacités d'observations terrestres dans le domaine marin. Ceci sera fait avec le réseau sismologique et géodésique français (Résif).

Le projet MARMOR a un double objectif :

• Structurer la communauté scientifique française, en lui fournissant les équipements nécessaires pour conduire des recherches d'excellence utilisant les outils de la sismologie et de la géodésie sous-marines.

• Mettre en place une infrastructure d'observation sous-marine à Mayotte pour :
- assurer les impératifs de surveillance sismologique continue, temps-réel et 24/7 ;
- conduire des recherches multidisciplinaires sur les phénomènes associés à la crise sismo-volcanique en cours.

Les développements sont divisés en 5 axes :

1- Géodésie sous-marine

La géodésie étudie la forme et les déformations de la Terre. Ce premier axe doit permettre d'acquérir l'instrumentation permettant de caractériser : les déformations verticales en utilisant des capteurs de pression placés en fond de mer et d'enregistrer le poids de la colonne d'eau et d'air au-dessus, poids qui change lorsque le fond bouge. ; les déformations horizontales en utilisant la technique du GNSS-A (GNSS acoustique).

2- Réponse rapide aux crises sismiques et volcaniques

Un parc mixte sera mis en place et comportera des sismomètres fond de mer légers, des hydrophones autonomes avec liens satellites et des capteurs de pression. Celui-ci sera mobilisable à tout moment et sera déployé sur des navires d'opportunité qui permettront des interventions en quelques jours pour suivre l'évolution de la sismicité en cas de crise.

3- Régénération des parcs de sismomètres fond de mer (OBS)

Le projet vise à mettre à disposition des scientifiques français un parc de sismomètres fond de mer (OBS) modernes pour observer en temps réel l'activité sismique et volcanique.

4- Recherche et développement en fibre optique

Le développement des fibres optiques a pour objectif premier de pouvoir détecter et mesurer en fond de mer, en temps réel, des sources naturelles de vibrations sismiques ou de déformations lentes en développant des inclinomètres, extensomètres et pressiomètres optiques, afin de comprendre les processus mécaniques à l'œuvre dans les systèmes sous-marins de failles, d'édifices volcaniques et de grands glissements de terrain. Les sismomètres et les pressiomètres optiques devraient contribuer à équiper l'observatoire sous-marin de Mayotte (Axe 5).

5- Observation sous-marine au large de Mayotte

En réponse à la crise sismo-volcanique en cours depuis mai 2018 au large de Mayotte, le projet prévoit le développement du premier observatoire sous-marin porté par l'Europe pour le suivi permanent, continu et long-terme de l'activité sismique et des déformations. L'infrastructure comportera un réseau de câbles électro-optiques et optiques pour un suivi temps réel. Cette infrastructure fournira aussi l'opportunité d'un suivi géochimique, biologique et écologique et sera mise à disposition de la communauté scientifique.

**A terme, l'OVPF sera en charge de l'exploitation de l'observatoire sous-marin en temps réel 24h/24h, 365j/an, via une salle serveur et l'atterrage des câbles et des fibres optiques sous-marins basés à Mayotte.**

Des groupes de travail, dont font partis les personnels scientifiques et techniques de l'OVPF, établissent et rédigent les cahiers des charges de l'axe 3 et de la solution d'atterrage, ainsi que de la salle serveur. Les OBS de l'axe 3 sont en cours de fabrication et un comité de suivi pour l'exécution du marché est en charge de s'assurer que tous les aspects fonctionnels et opérationnels sont respectés via des échanges régulés avec le fournisseur.

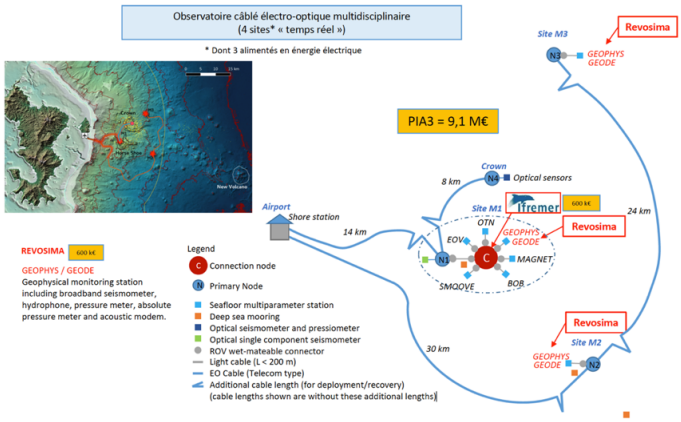


*Figure 98 : MARMOR, observatoire câblé électro-optique multidisciplinaire sur 4 sites « temps réels ».*

## 12. Implications de l'OVPF pour l'observatoire magnétique de La Réunion

Le service des observatoires magnétiques de l'IPGP fournit des observations au sol du champ magnétique terrestre ainsi que des produits dérivés. Il fait partie du Bureau Central de Magnétisme Terrestre (BCMT) qui est un Service National d'Observation (SNO) du CNRS-INSU géré par l'IPGP, auquel participe aussi le service d'observation magnétique de l'EOST à Strasbourg.
L'IPGP maintient douze observatoires au travers le monde, en collaboration avec des institutions françaises et internationales : l'observatoire magnétique national de Chambon-la-Forêt et ceux de Borok (Russie), Dalat (Vietnam), Île de Pâques (Chili), Edéa (Cameroun), Kourou (Guyane), Lanzhou (Chine), Sop/Niakhar (Sénégal), Phu Thuy (Vietnam), Pamatai (Polynésie française) et Tamanrasset (Algérie) (Figure 99).

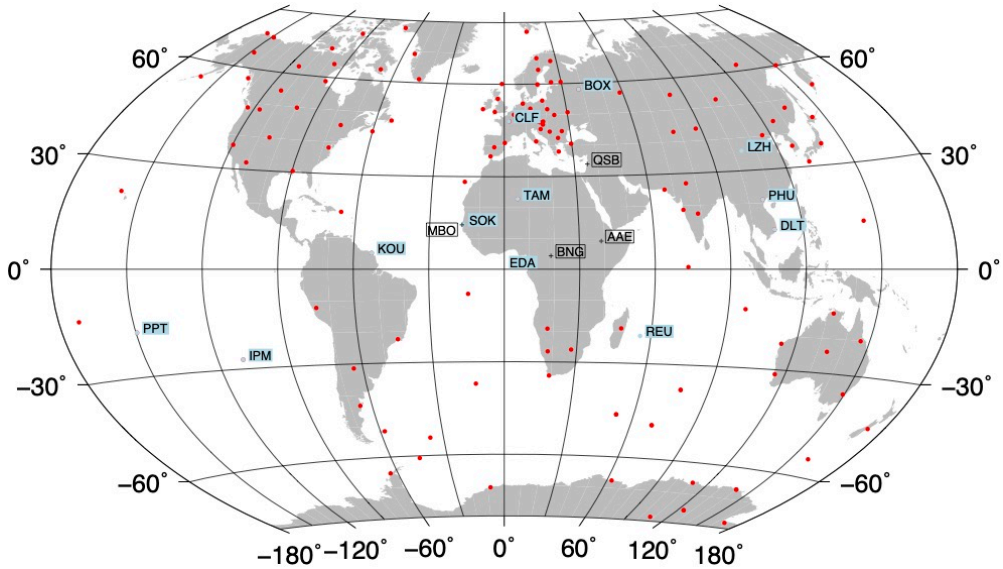


*Figure 99 : Carte de localisation des observatoires magnétiques gérés par l'IPGP (en bleu). En noir : les observatoires fermés mais disposant de longues séries de donnée). En rouge : toutes les stations du réseau INTERMAGNET.*

Depuis novembre 2022, l'observatoire de La Réunion (code IAGA : REU) est opérationnel à Bourg Murat, à 500 m de l'OVPF, sur une parcelle de l'Office national des forêts. L'installation complète a été réalisée en une année en 3 étapes (choix du site, gros œuvre et installation des équipements) grâce à une étroite collaboration entre les équipes de l'OVPF et des observatoires magnétiques de l'IPGP (Figure 100).

REU, comme tout observatoire magnétique, nécessite des mesures d'étalonnage hebdomadaires par des observateurs locaux spécifiquement formés. Cette tâche, ainsi que la maintenance, sont assurées par l'OVPF. Trois personnels de l'équipe technique ont ainsi été formés pour effectuer une mesure d'étalonnage par semaine. Les équipements et leur calibration ainsi que le traitement et diffusion de données sont assurés par l'équipe des observatoires magnétiques. L'observatoire magnétique de La Réunion nouvellement installé devrait rejoindre le réseau INTERMAGNET, l'organisation internationale d'observatoires magnétiques, après 1 an d'enregistrements et de mesures d'étalonnage.

Les observatoires fournissent des données temps-réel, quasi-définitives et définitives, qui sont distribuées sous la forme de données secondes, de moyennes sur une minute ou sur de plus longues périodes (heure, jour, mois, année). Ces données sont distribuées via les portails web du BCMT et d'INTERMAGNET, mais aussi à travers les centres de données mondiaux pour les données magnétiques (World Data Centres - WDC) au Royaume-Uni, aux USA et au Japon. Ces données sont utilisées en premier lieu pour des activités de recherche (dynamique du noyau liquide de la Terre, conductivité du manteau, structure de la croûte, dynamiques de l'ionosphère et de la magnétosphère), mais également comme des références d'orientation pour l'industrie et comme outils pour le suivi de la météorologie de l'espace.

| | | |
|---|---|---|
| | | |
| *Pose du tube de protection du magnétomètre scalaire.* | *Pose des pierres retirées près des capteurs sous le support panneau solaire. En arrière-plan, le décaissement de la parcelle limitrophe et vue sur la route.* | *Caisson météo ouvert dans lequel se trouve l'armoire des électroniques des magnétomètres.* |

*Figure 100 : Installation de la station magnétique REU à Bourg Murat en 2022.*

# 13. Publications

## > Publications dans des revues scientifiques internationales de rang A

Les travaux de recherche de l'observatoire portant sur le Piton de la Fournaise et Mayotte, mais aussi sur d'autres zones géographiques du globe ont été publiés dans des revues scientifiques internationales spécialisées ou dans des chapitres de livres spécialisés.

En 2022, les membres de l'équipe de l'OVPF ont ainsi participé à la production de 36 publications dans des revues scientifiques internationales de rangs A et B(*).

Bazin, S., JY. Royer, F. Dubost, F. Paquet, B. Loubrieu, A. Lavayssière et al. (2022), Initial results from a hydroacoustic network to monitor submarine lava flows near Mayotte island. Comptes Rendus. Géoscience, 354(S2), 1-17.

Berthod, C., JC. Komorowski, L. Gurioli, E. Medard, P. Bachèlery, P. Besson, P. Verdurme, MO. Chevrel, A. Di Muro, A. Peltier, JL. Devidal et al. (2022), Temporal magmatic evolution of the Mayotte offshore eruption revealed by in situ submarine sampling and petrological monitoring, Comptes Rendus. Géoscience, pp. 1-29. https://doi.org/10.5802/crgeos.155.

Cadeau, P., D. Jézéquel, A. Groleau , A. Di Muro, A., M. Ader, M. (2022), Impact of the seismo-volcanic crisis offshore Mayotte on the Dziani Dzaha Lake, Comptes Rendus. Géoscience, 354(S2), 1-18.

Calais, E., S. Symithe, T. Monfret, B. Delouis, A. Lomax, F. Courboulex, J. P. Ampuero, P. E. Lara, Q. Bletery, J. Chèze, F. Peix, A. Deschamps, B. de Lépinay, B. Raimbault, R. Jolivet, S. Paul, S. St Fleur, D. Boisson, Y. Fukushima, Z. Duputel, L. Xu, L. Meng (2022), Citizen seismology helps decipher the 2021 Haiti earthquake, Science, v. 376, no. 6590, pp. 283-287.

* Cayol, V., A. Peltier, JL. Froger, F. Beauducel (2022), La surveillance de la déformation des volcans, Encyclopédie SCIENCES, Aléas et surveillance de l'activité volcanique, volume 2, ed. Lénat J.F., Encyclopédie Sciences, ISTE-Wiley éditions, Londres 2021. ISBN 9781789480450.

Chevrel, MO., A. Harris, A. Peltier, N. Villeneuve, D. Coppola, M. Gouhier, S. Drenne (2022), Volcanic crisis management supported by near real time lava flow hazard assessment at Piton de la Fournaise, Volcanica 5(2), pp. 313–334. https://doi.org/10.30909/vol.05.02.313334.

Corsaro, RA., C.M. Petrone, A. Pietruska, A. Peltier (2022), Editorial: Basaltic volcanism: From magmatic processes to eruptive styles. Frontiers in Earth Science. doi: 10.3389/feart.2022.982459.

Dezayes, C., V. Famin, B. Tourlière, JM. Baltassat, B. Bénard (2022), Potential areas of interest for the development of geothermal energy in La Réunion Island based on GIS analysis, Journal of Volcanology and Geothermal Research, 421, 107450.

Dumont, Q., V. Cayol, JL. Froger, A. Peltier (2022), 22 years of satellite imagery reveal a major destabilization structure at Piton de la Fournaise, Nat Commun 13, 2649. https://doi.org/10.1038/s41467-022-30109-w.

* Duputel, Z (2022), Co-Seismic Phase: Imaging the Seismic Rupture, The Seismic Cycle - From Observation to Modeling, ISTE Book - Edited by F. Rolandone. pp. 39-78.

Gailler, L., P. Labazuy, E. Régis, A. Peltier, V. Ferrazzini (2022), Active structures and thermal state of the Piton de la Fournaise summit revealed by combined UAV magnetic and thermal infrared measurements, Volcanica, 5(1), pp. 61–74. doi: 10.30909/vol.05.01.6174.

Gerbault, M., F. Fontaine, A. Peltier, JL. Got, R. Hassani, V. Ferrazzini, L. Gailler, Z. Duputel (2022), What causes the persistent seismicity below the eastern flank of Piton de la Fournaise (Réunion Island)? Elasto-plastic models of magma inflation, Journal of Volcanology and Geothermal Research, 431, https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2022.107628.

Harris, A., S. Mannini, L. Calabrò, S. Calvari, L. Gurioli, MO. Chevrel, M. Favalli, N. Villeneuve (2022), Forest destruction by 'a'a lava flow during Etna's 2002-03 eruption: Mechanical, thermal and environmental interactions, Journal of Volcanology and Geothermal Research. 429:107621. https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2022.107621.

Harris, A., S. Rowland, MO. Chevrel (2022), Anatomy of a channel-fed 'a'a lava flow system, Bulletin of Volcanology 84:70 https://doi.org/10.1007/s00445-022-01578-0

Hoang, C., O. Magand, J. Brioude, A. Dimuro, C. Brunet, C. Ah-Peng, Y. Bertrand, A. Dommergue, Y. Duan Lei, F. Wania (in press), Probing the Limits of Sampling Gaseous Elemental Mercury Passively in the Remote Atmosphere, Environmental Science Atmospheres, Royal society of chemistry.

Kolzenburg, S., MO. Chevrel, D. Dingwell (2022), Magma suspension rheology, Reviews in Mineralogy and Geochemistry 87 (1): 639–720. http://dx.doi.org/10.2138/rmg.2022.87.14.

Liuzzo, M., A. Di Muro, AL. Rizzo, F. Grassa, M. Coltorti, M. Ader (2022), The composition of gas emissions at Petite Terre (Mayotte, Comoros): inference on magmatic fingerprints, Comptes Rendus. Géoscience, *354*(S2), 1-24.

Mittal, T., J. Jordan, L. Retailleau, F. Beauducel, A. Peltier (2022), Mayotte 2018 eruption likely sourced from a magmatic mush, Earth and Planetary Science Letters, Earth and Planetary Science Letters, 590, 117566.

Morales-Yáñez, C., Z. Duputel, L. Rivera (2022), Exploring the link between large earthquakes and magma transport at the onset of the Mayotte volcano-seismic crisis, Comptes Rendus. Géoscience, 354(S2), 1-16.

* Paris, R., P. Bani, MO. Chevrel, F. Donnadieu, J. Eychenne, PJ. Gauthier, M. Gouhier, D. Jessop, K. Kelfoun, S. Moune, O. Roche, JC. Thouret (2022), Volcanic Hazards in Hazards and Monitoring of Volcanic Activity Vol.1. Ed. JF Lénat ISBN : 9781789450439. 250pp

Pastén-Araya, F. , B. Potin, K. Azúa, M. Sáez, F. Aden-Antoniów, S. Ruiz, L. Cabrera, J.-P. Ampuero, L. Rivera, Z. Duputel, 2022. Along-dip segmentation of the slip behavior and rheology of the Copiapó ridge subducted in north-central Chile, Geophys. Res. Lett., v. 49, pp. e2021GL09547.

Peltier, A., M.O. Chevrel, A.J.L. Harris, N. Villeneuve (2022), Reappraisal of gap analysis for effusive crises at Piton de la Fournaise, Journal of Applied Volcanology, 11:2, https://doi.org/10.1186/s13617-021-00111-w.

Peltier, A., S. Saur, V. Ballu, F. Beauducel, P. Briole, K. Chanard, D. Dausse, JB. De Chabalier, R. Grandin, P. Rouffiac, YT. Tranchant, M. Bès de Berc, S. Besançon, P. Boissier, C. Broucke, C. Brunet, K. Canjamalé, E. Carme, P. Catherine, A. Colombain, W. Crawford, R. Daniel, G. Dectot, N. Desfete, C. Doubre, T. Dumouch, C. Griot, M. Grunberg, H. Jund, P. Kowalski, F. Lauret, J. Lebreton, F. Pesqueira, F. Tronel, P. Valty, J. van der Woerd (2022), Ground deformation monitoring of the eruption offshore Mayotte, Comptes Rendus. Géoscience, pp. 1-23. https://doi.org/10.5802/crgeos.176.

Prival, JM., AJL. Harris, E. Zanella, CR. Test, L. Gurioli, MO. Chevrel, J. Biren (2022), Emplacement dynamics of a crystal rich, highly viscous trachyte flow of the Sancy stratovolcano (France), GSA Bulletin 2022, https://doi.org/10.1130/B36415.1.

Ramírez-Uribe, I., C. Siebe, MO. Chevrel, D. Ferrés, S. Salinas (2022), The Late Holocene Nealtican lava-flow field from Popocatépetl volcano: Emplacement dynamics and implications for future hazard scenarios and archaeology, GSA Bulletin. 134 (11-12): 2745–2766. https://doi.org/10.1130/B36173.1.

Retailleau, L., J.-M. Saurel, W. Zhu, C. Satriano, G. C. Beroza, S. Issartel, P. Boissier, OVPF Team, OVSM Team (2022a), A Wrapper to Use a Machine-Learning- Based Algorithm for Earthquake Monitoring, Seismol. Res. Lett., 93 (3): 1673–1682. doi: https://doi.org/10.1785/0220210279

Retailleau, L., J.-M. Saurel, M. Laporte, A. Lavayssière,V. Ferrazzini, W. Zhu, G.C. Beroza, C. Satriano, JC. Komorowski, OVPF Team (2022b), Automatic detection for a comprehensive view of Mayotte seismicity, Comptes Rendus. Géoscience, pp. 1-18. doi : 10.5802/crgeos.133.

Saurel, JM., E. Jacques, C. Aiken, A. Lemoine, L. Retailleau, A. Lavayssière, O. Foix, A. Dofal, A. Laurent, N. Mercury, W. Crawford, A. Lemarchand, R. Daniel, P. Pelleau, M. Bès de Berc, G.. Dectot, D. Bertil, A. Roullé, C. Broucke, A. Colombain, H. Jund, S. Besançon, P. Guyavarch, P. Kowalski, M. Roudaut, R. Apprioual, J. Battaglia, S. Bodihar, P. Boissier, M.P. Bouin, C. Brunet, K. Canjamale, P. Catherine, N. Desfete, C. Doubre, R. Dretzen, T. Dumouche, P. Fernagu, V. Ferrazzini, F. Fontaine, A. Gaillot, L. Géli, C. Griot, M. Grunberg, E. Can Guzel, R. Hoste-Colomer, S. Lambotte, F. Lauret, F. Léger, E. Maros, A. Peltier, J. Vergne, C. Satriano, F. Tronel, J. Van der Woerd, Y. Fouquet, S.J. Jorry, E. Rinnert, I. Thinon, N. Feuillet (2022), Mayotte seismic crisis: building knowledge in near real-time by combining land and ocean-bottom seismometers, first results. Geophysical Journal International, 228(2), 1281-1293.

Saurel, J. M., Retailleau, L., Deplus, C., Loubrieu, B., Pierre, D., Frangieh, M. et al., (2022), Combining hydro-acoustic sources and bathymetric differences to track the vent evolution of the Mayotte eruption, Mozambique Channel, Frontiers in Earth Science, 10.

Smittarello, D., B. Smets, J. Barrière, C. Michellier, A. Oth, T. Shreve, R. Grandin, N. Theys, H. Brenot, V. Cayol, P. Allard, C. Caudron, MO. Chevrel, F. Darchambeau et al. (2022), Precursor-free eruption triggered by edifice rupture at Nyiragongo volcano, Nature 609, 83-88. https://doi.org/10.1038/s41586-022-05047-8.

Soltanmohammadi, A., M. Grégoire, F.J. Fontaine, LP. Bédard, M. Blanchard, M. Rabinowicz (2022), Melt percolation, concentration and dyking in the Hawaiian mantle plume and overriding lithosphere: links to the evolution of lava composition along the volcanic chain, Journal of Petrology, 63(1), egab101.

Tadini, A., A. Harris, J. Morin, A. Bevilacqua, A. Peltier, W. Aspinall, S. Ciolli, P. Bachèlery, B. Bernard, J. Biren, A. Brum da Silveira, V. Cayol, O. Chevrel, D. Coppola, H. Dietterich, A. Donovan, O. Dorado, S. Drenne, O. Dupéré, L. Gurioli, S. Kolzenburg, JC. Komorowski, P. Labazuy, D. Mangione, S. Mannini, F. Martel-Asselin, E. Médard, S. Pailot-Bonnétat, V. Rafflin, M. Ramsey, N. Richter, S. Vallejo, N. Villeneuve, S. Zafrilla (2022), Structured elicitation of expert judgement in real-time eruption scenarios: an exercise for Piton de la Fournaise volcano, La Réunion island, Volcanica, 5(1), pp. 105–131. doi: 10.30909/vol.05.01.105131.

Twardzik, C., Z. Duputel, R. Jolivet, E. Klein, P. Rebischung (2022), Bayesian inference on the initiation phase of the 2014 Iquique, Chile, earthquake, Earth and Planetary Science Letters, 600, 117835.

Thivet, S., J. Carlier, L. Gurioli, A. Di Muro, P. Besson, M. Smietana et al. (2022), Magmatic and phreatomagmatic contributions on the ash-dominated basaltic eruptions: Insights from the April and November–December 2005 paroxysmal events at Karthala volcano, Comoros, Journal of Volcanology and Geothermal Research, 424, 107500.

Verdurme, P., S. Carn, A.J. Harris, D. Coppola, A. Di Muro, S. Arellano, L. Gurioli (2022), Lava Volume from Remote Sensing Data: Comparisons with Reverse Petrological Approaches for Two Types of Effusive Eruption, Remote Sensing, 14(2), 323.

Vergani, D., J. McPhie, R. Carey, A. Di Muro (2022), Intracaldera explosions and lava emissions during the 2007 caldera collapse of Piton de la Fournaise, La Réunion Island, Bulletin of Volcanology, *84*(3), 1-19.

## > Congrès scientifiques nationaux et internationaux

En 2022, les membres de l'équipe de l'OVPF ont participé, ou ont été associés, à 15 présentations de congrès nationaux et internationaux.

Benard, B, A. Di Muro, M. Liuzzo, S. Gurrieri, P. Boissier, C. Brunet, N. Desfete, Ph. Kowalski, F. Laure (2022), Environmental parameters and abiotic processes driving seasonality of soil CO2 emissions in volcanic settings (Piton de la Fournaise and Mayotte, France), Abstract EP55B-05, 2022 Fall Meeting, AGU, Chicago.

Brunet, C., F. Lauret, P. Catherine, K. Canjamalé, N. Desfete, F. Beauducel, A. Peltier (2022), New sub-surface low cost tiltmeter for quick and easy installation in volcano context, Abstract IN32B-0391, 2022 Fall Meeting, AGU, Chicago.

Brunet, C. (2022), Instrumentation et capteurs à bas coût : inclinométrie, RTK, station multi-gaz GETS, Journée de l'Aléa Gravitaire, Montpellier.

Chevrel, MO., A. Harris, A. Peltier, N. Villeneuve, D. Coppola, M. Gouhier, S. Drenne (2022), Gestion des crises volcaniques par une évaluation des risques liés à la mise en place des coulées de lave en temps quasi-réel au Piton de la Fournaise, La Réunion, Assises nationales des risques naturels 2022 (ANRN). Strasbourg, France.

Dumont, Q., V. Cayol, J.-L. Froger, A. Peltier (2022), A major destabilization structure revealed by 22 years of InSAR monitoring at Piton de la Fournaise volcano, Cities on volcanoes 11 – COV11 - Crete 2022.

Duputel, Z. (2022), Seismicity at Piton de la Fournaise: from Micro-earthquakes to Caldera Collapses, Nov. 2022, ETH Geophysical Institutes Colloquium.

Duputel, Z., V. Ferrazzini, O. Lengliné, L. Rivera, C. Journeau (2022), VLP oscillations of Piton de la Fournaise: Insights into Caldera Collapses and Dike resonance, June 2022. Workshop for the 40th Anniversary of the GEOSCOPE Observatory.

Firode, L., Z. Duputel, V. Ferrazzini, O. Lengliné (2022), Seismic evidence of an aseismic slip event preceding and following the 2017, Valparaiso, Mw 6.9 earthquake, Oct. 2022, 12th International Conference on statistical Seismology (STATSEI).

Journeau, C., A. Peltier, N. Shapiro, F. Beauducel, V. Ferrazzini, Z. Duputel, B. Taisne (2022), Joint analysis of GNSS and seismic data to track magma transport at Piton de la Fournaise volcano (La Réunion, France). Abstract EGU2022- 9024, Vienna.

Mingo Mauro, A., E. Widom, D. Kuentz, C. Siebe, P. Larrea, MO. Chevrel, MN. Guilbaud, S. Salinas (2022), Evolution of the El Metate Shield Volcano, Michoacán–Guanajuato Volcanic Field, Mexico, Chapman conference, USA.

Moutote, L., Z. Duputel, O. Lengliné (2022), Seismicity under a dormant volcano: identification of an active crustal fault below Piton des Neiges, Oct. 2022, 12th International Conference on statistical Seismology (STATSEI).

Pischiutta, M., R. Puglia, V. Ferrazzini, M. Savage, Z. Duputel, C. Journeau, A. Di Muro, A. Peltier (2022), Spatial and temporal variations of ambient noise polarization on Piton de La Fournaise volcano, Cities on volcanoes 11 – COV11 - Crete 2022.

Fauria, K.E., M. Jutzeler, T. Mittal, A. Kumar Gupta, L. Kelly, J. Rausch, R. Bennartz, B. Delbridge, L. Retailleau (2022), Simultaneous Creation of a Large Vapor Plume and Pumice Raft by an Explosive Submarine Eruption, Abstract IN32B-0391, 2022 Fall Meeting, AGU, Chicago.

Saurel, JM., F.R. Fontaine, R. Moretti, A. Peltier, F. Beauducel, P. Boissier, C. Brunet, J. Corbeau, S. Deroussi, R. Dumeige, V. Durand, R. Grandin, M. Heap, P. Kowalski, F. Lauret, A. Mangeney, M. Perruzzetto, M. Rosas-Carbajal, D. Vaton, JC. Komorowski, A. Lemarchand (2022), Surveillance et étude de l'aléa gravitaire sur les volcans actifs français, Journée de l'Aléa Gravitaire, Montpellier.

Villeneuve, N., F. Martel, S. Narbaud, B. Labrosse, A. Harris, A. Finizola, MO. Chevrel, A. Peltier (2022), Attractivité d'un site incontournable, surfréquentation pendant les éruptions et crainte de l'accident ou Les ingrédients d'une gestion complexe des flux de visiteurs au Piton de la Fournaise, Assises nationales des risques naturels 2022 (ANRN). Strasbourg, France.