ISSN 2610-5101

Rapport annuel 2023

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

> Remerciements ... 3

1. Présentation de l'observatoire ... 4
> Préambule ... 4
> Budget ... 5
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 2023 ... 11
4. Sismicité ... 19
> Le réseau sismologique de l'OVPF ... 19
> Activité sismique en 2023 ... 21
5. Géodésie ... 32
> Les réseau de surveillance de la déformation de l'OVPF ... 32
> Observation des déformations en 2023 ... 36
6. Géochimie ... 43
> Surveillance des émissions gazeuses du massif du Piton de la Fournaise ... 43
> Émission de SO_2 (Réseau DOAS « NOVAC ») ... 44
> Mesures Multigas ... 45
> Émissions de CO_2 par le sol ... 46
> Caractérisation et suivi des émissions gazeuses sur le massif du Piton des Neiges ... 49
> Composition des produits solides de l'éruption du 2 juillet – 10 août 2023 ... 51
7. Imagerie et télédétection ... 65
> L'INSAR (Interferometric Synthetic Aperture Radar) ... 65
> Images de la constellation PlanetScope ... 68
> L'optique ... 69
> Le Multi-spectral ... 70
8. Réalisations techniques et informatiques ... 73
> Réalisations techniques ... 74
> Réalisations informatiques ... 88
9. Projets ambitieux au sein de l'OVPF ou en collaboration avec l'OVPF ... 96
> Projets ANR ... 96
> Projets européens ... 97
> Autres projets ... 100
> Collaborations internationales d'échanges ... 100

10. Sollicitations médiatiques et interventions grand public 102
> Sollicitations médiatiques 102
> Interventions grand public 102
> Réseaux sociaux et site web 106
> Distinctions 106
11. Implications de l'OVPF dans le suivi de l'activité à Mayotte 107
> Surveillance H24 de l'activité sismo-volcanique de Mayotte 108
> Campagnes en mer 114
> Projet MARMOR 116
12. Implications de l'OVPF pour l'observatoire magnétique de La Réunion 119
13. Publications 121
> Publications dans des revues scientifiques internationales de rang A 121
> Congrès scientifiques nationaux et internationaux 123

> 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, MAPPPROM, Météo-France, MétéoR-OI, Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche - MESR, Ministère de l'intérieur et des Outre-Mer - MIOM, Ministère de la Transition Écologique et de la Cohésion des Territoires - MTECT, 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…

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. L'IPGP héberge l'UMR 7154 IPGP, qui regroupe l'ensemble des activités de recherche de l'institut, et en assure la tutelle avec l'Université Paris Cité (dont il est établissement composante) ainsi qu'avec le CNRS, l'Université de La Réunion et l'IGN. L'IPGP héberge l'UAR 3454 IPGP qui regroupe toutes les activités d'observation de l'institut et en assure la tutelle avec le CNRS.

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*) et à La Réunion (*OVPF : observatoire volcanologique du Piton de la Fournaise*), l'IPGP assure des observations permanentes sur les systèmes volcaniques actifs français d'Outre-mer. Depuis 2019, le *REVOSIMA (réseau de surveillance volcanologique et sismologique de Mayotte*) est également opéré par l'IPGP en collaboration avec le BRGM. 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 tsunamis 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 et 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 112 capteurs de surveillance déployés sur 70 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 2023 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 MESR, MTECT et CNRS), la région Réunion et la préfecture de La Réunion, pour un total en 2023 d'environ 1,8 million d'euros de frais de personnel et 241 000 euros de frais de fonctionnement / investissement (Tableau 1, Figure 1). A cela s'ajoutent les dotations ponctuelles sur projets de recherche ; de 78 876 euros en 2023 (cf. section 9 pour les détails sur les projets de recherche).

En détail le budget annuel 2023 :

	Personnels permanents	**Personnels non permanents**	**Financement récurrent**	**Financement sur convention (annuelle ou pluriannuelle)**	**Projets recherche**
IPGP (MESR)	1 011 524		50 000		
IPGP (CNRS)	657 246		31 000		
IPGP (MTECT)				55 000	
IPGP REVOSIMA			25 000	50 000	
Région Réunion				(report sur 2024)	
Préfecture Réunion				30 000	
Projet Interreg		53 623			69 300
Projet ERC		86 908			9 576
	Totaux Frais de personnel		**Totaux** Investissement /Fonctionnement		
	1 809 301 €		**319 876 €**		

Dépenses 2023 - Fonctionnement OVPF - Dépenses récurrentes	
Téléphonie	12 820
Électricité	14 755
Internet	14 430
Entretien bureau	12 911
Helilagon	13 000
Transmission satellite Glorieuse	9 585
Abonnement tel satellite et InReach	6 141
Assurance Véhicules	6 042
Essence Véhicules	4 000
Révisions et CT Véhicules	1 182
TAAF	5 000
Maintenance groupe électrogène	1 577
Cartouche encre	1 346
ANFR (radio)	1 350
Maintenance incendie	1 002
Données Lél@	813
Traduction bulletin Mayotte	631
Socotec	567
Eau	325
Produits ménagers	500
Total	**107 977 €**

Tableau 1 : (En haut) Tableau synthétisant le budget annuel de l'OVPF en 2023 (intégrant les financements dédiés à la surveillance REVOSIMA). (En bas) Tableau synthétisant les dépenses récurrentes de fonctionnement de l'observatoire en 2023. Ne sont pas répertoriées les dépenses d'équipements, de fournitures pour les stations, de missions, d'analyses etc.

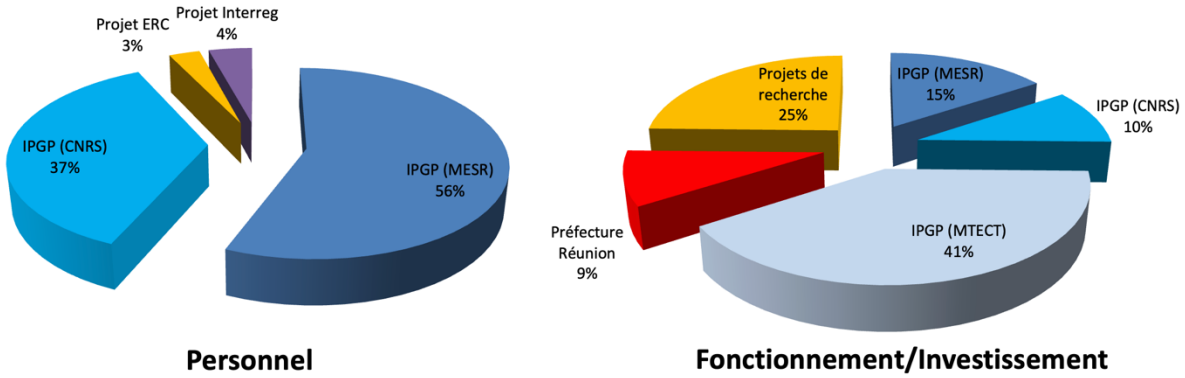

Figure 1 : (à gauche) répartition des frais de personnel et (à droite) de fonctionnement/investissement du budget annuel 2023 de l'OVPF (incluant le fonctionnement pour la surveillance opérationnelle du REVOSIMA).

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 2023, le personnel était constitué de seize personnes travaillant en CDI à temps complet (Figure 2) et deux CDD (une post-doctorante et un ingénieur d'étude).

Prénom NOM	Fonction
Équipe scientifique	
Oryaëlle 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
Michel Frangieh	Ingénieur - Sismologie
Marine Ménager	Post-doctorante - Sismologie
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

Tableau 2 : Personnel de l'OVPF au 31/12/2023.

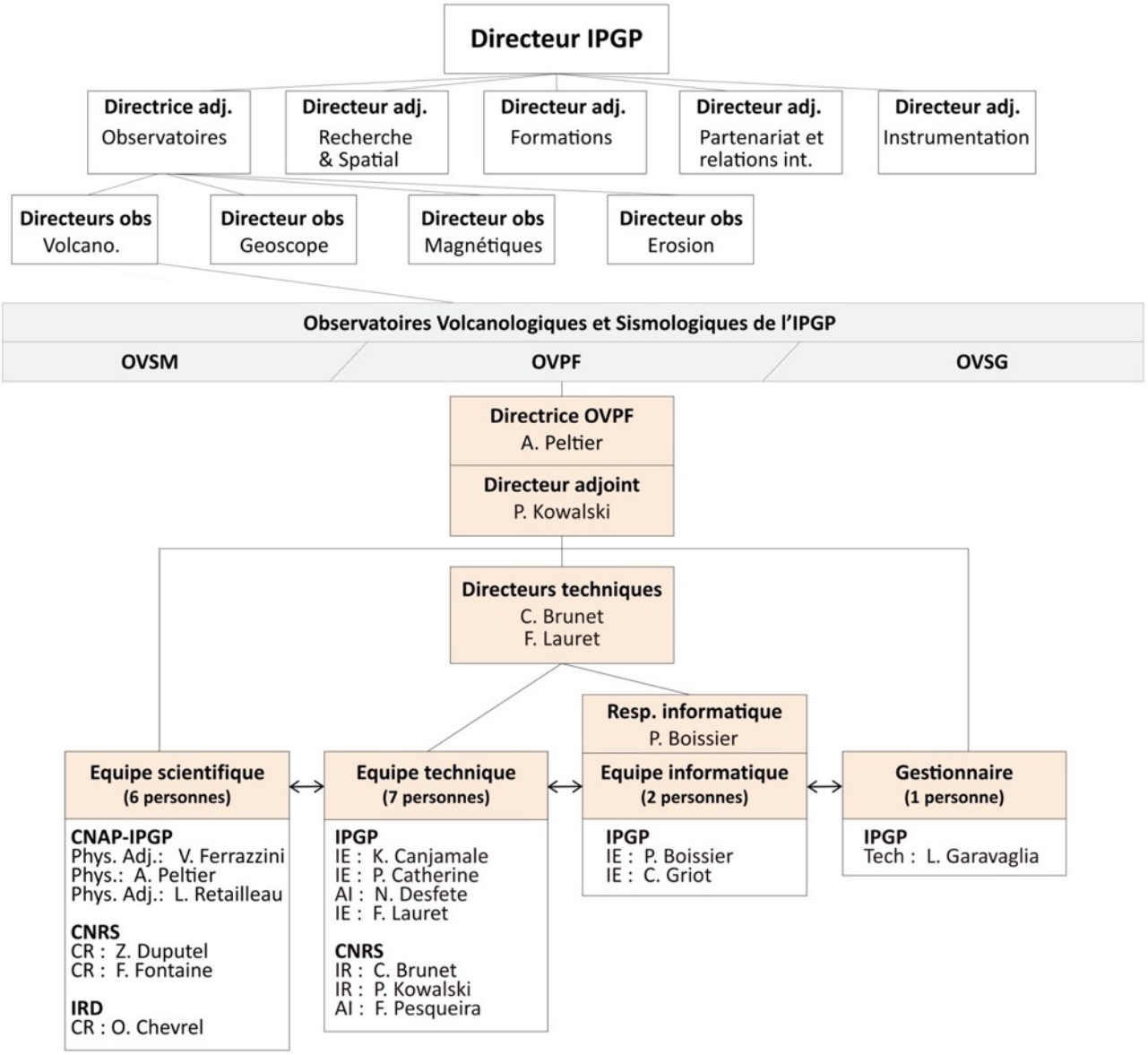

Figure 2 : Organigramme du personnel permanent de l'OVPF au 31/12/2023. CR : Chargé de recherche, IE : Ingénieur d'étude, IR : Ingénieur de recherche, Phys. : Physicien, Phys. Adj : Physicien Adjoint, Tech : Technicien.

> 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 2023, l'OVPF a accueilli 18 stagiaires (Tableau 3).

date début	date fin	Prénom Nom	Encadrants	Niveau	Origine
04/02/2023	01/07/2023	Lucile Costes	Z. Duputel – V. Ferrazzini	M2	IPGP
20/02/2023	24/02/2023	Eroan Hoareau	Équipe OVPF	3ième	Collège de Trois Mares
20/02/2023	24/02/2023	Quentin Rivière	Équipe OVPF	3ième	Collège de Trois Mares
20/02/2023	24/02/2023	Gangnant Eli Clain	Équipe OVPF	3ième	CNED
20/02/2023	24/02/2023	Ingrid Lepinay	Équipe OVPF	3ième	Collège Marthe Robin - Le Tampon
14/03/2023	12/06/2023	Cyrielle Colin	L. Retailleau – Z. Duputel – V. Ferrazzini	M2	EOST
05/06/2023	30/07/2023	Léo Mougin	Frédéric Lauret	3ième année	École d'ingénieur - Telecom Nancy
05/06/2023	05/07/2023	Lea Naussans	Lise Retailleau	1ere année	EOST
05/06/2023	05/07/2023	Melisende Metais-Bossard	Lise Retailleau	1ere année	EOST
05/06/2023	05/07/2023	Zoe Plunian	Lise Retailleau	1ere année	EOST
05/06/2023	05/07/2023	Oscar Chazelle	Lise Retailleau	1ere année	EOST
13/11/2023	17/11/2023	Kendra Canjamalé	Équipe OVPF	3ième	Collège Hippolyte Foucque (Sainte Suzanne)
11/12/2023	15/12/2023	Dario Gaudin	Équipe OVPF	3ième	Collège de Petite Ile
11/12/2023	15/12/2023	Pierre Gauthier	Équipe OVPF	3ième	Collège du 12ième
11/12/2023	15/12/2023	Susie Fontaine	Équipe OVPF	3ième	Collège du 14ième
11/12/2023	15/12/2023	Luis Payet	Équipe OVPF	3ième	Collège du 14ième
11/12/2023	15/12/2023	Antoine Rohel	Équipe OVPF	3ième	Collège Guy de Maupassant (Fleury-sur-Andelle)
11/12/2023	15/12/2023	Lilian Knecht	Équipe OVPF	3ième	Collège le Ruisseau (Saint Louis)

Tableau 3 : Tableau synthétisant l'accueil de stagiaires et étudiants à l'OVPF en 2023.

Accueil de doctorants

En 2023, l'OVPF a accueilli 3 doctorants.

- Lise Firode
  . Sujet de thèse : Seismicity of Piton des Neiges and Piton de la Fournaise
  . Directeur de thèse : Zacharie Duputel (OVPF-IPGP)
  . Co-encadrants : 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

- Matthieu Nougaret
  . Sujet de thèse : Analyse de signaux pluridisciplinaires par algorithmes intelligents pour l'anticipation des éruptions au Piton de la Fournaise
  . Directeur de thèse : Aline Peltier (OVPF-IPGP)
  . Co-encadrants : Charles Lelosq (IPGP) et Lise Retailleau (OVPF-IPGP)
  . École doctorale : ED 560 : STEP'UP, Université Paris Cité
  . Début et fin de thèse : 01/10/2022 - 30/09/2025
  . Date de séjour à l'OVPF : du 15/01/2023 au 14/02/2023

- Clément de Sagazan
  . Sujet de thèse : Modeling local strain and deep structures associated with magmatism and earthquakes in Mayotte
  . Directeurs de thèse : Aline Peltier (OVPF-IPGP) et Wayne Crawford (IPGP)
  . Co-encadrants : Lise Retailleau (OVPF-IPGP), Fabrice Fontaine (OVPF-IPGP), Nathalie Feuillet (IPGP)
  . École doctorale : ED 560 : STEP'UP, Université Paris Cité
  . Début et fin de thèse : 01/10/2022 - 30/09/2025
  . Date de séjour à l'OVPF : du 31/01/2023 au 22/12/2023

Accueil de missionnaires

L'OVPF a également accueilli 15 missionnaires (enseignants-chercheurs, ingénieurs, techniciens) provenant de différents instituts et universités françaises ou étrangères (Tableau 4).

date début	date fin	Prénom Nom	Origine
18/02/2023	24/02/2023	Jean-Marie Saurel	IPGP
04/05/2023	20/05/2023	Lydie Gailler	LMV-UCA
04/05/2023	20/05/2023	Nicolas Cluzel	LMV-UCA
04/05/2023	20/05/2023	Thierry Souriot	LMV-UCA
04/05/2023	20/05/2023	Guillaume Boudoire	LMV-UCA
04/05/2023	20/05/2023	Philippe Labazuy	LMV-UCA
04/05/2023	20/05/2023	Laurent Metral	ISTerre - Grenoble
21/06/2023	05/07/2023	Salim M'Madi Issimail	OVK
21/06/2023	05/07/2023	Wardate Mohamed	OVK
12/07/2023	18/07/2023	Andrea Di Muro	Université de Lyon
05/11/2023	17/11/2023	Andrea Di Muro	Université de Lyon
05/11/2023	17/11/2023	Lucia Gurioli	LMV-UCA
05/11/2023	17/11/2023	Margherita Polacci	Université de Manchester
05/11/2023	17/11/2023	Barbara Bonechin	Université de Manchester
05/11/2023	17/11/2023	Elisa Biagioli	Université de Manchester

Tableau 4 : Tableau synthétisant l'accueil de missionnaires à l'OVPF en 2023.

3. Résumé de l'activité du Piton de la Fournaise en 2023

L'année 2023 au Piton de la Fournaise fut marquée par une éruption à l'intérieur de la caldera de l'Enclos Fouqué du 2 juillet au 10 août (Figure 3), ainsi que par une intrusion sous le sommet qui n'a pas débouché sur une activité de surface le 21 avril. Au total, cette activité a représenté 39 jours d'éruption sur l'ensemble de l'année 2023.

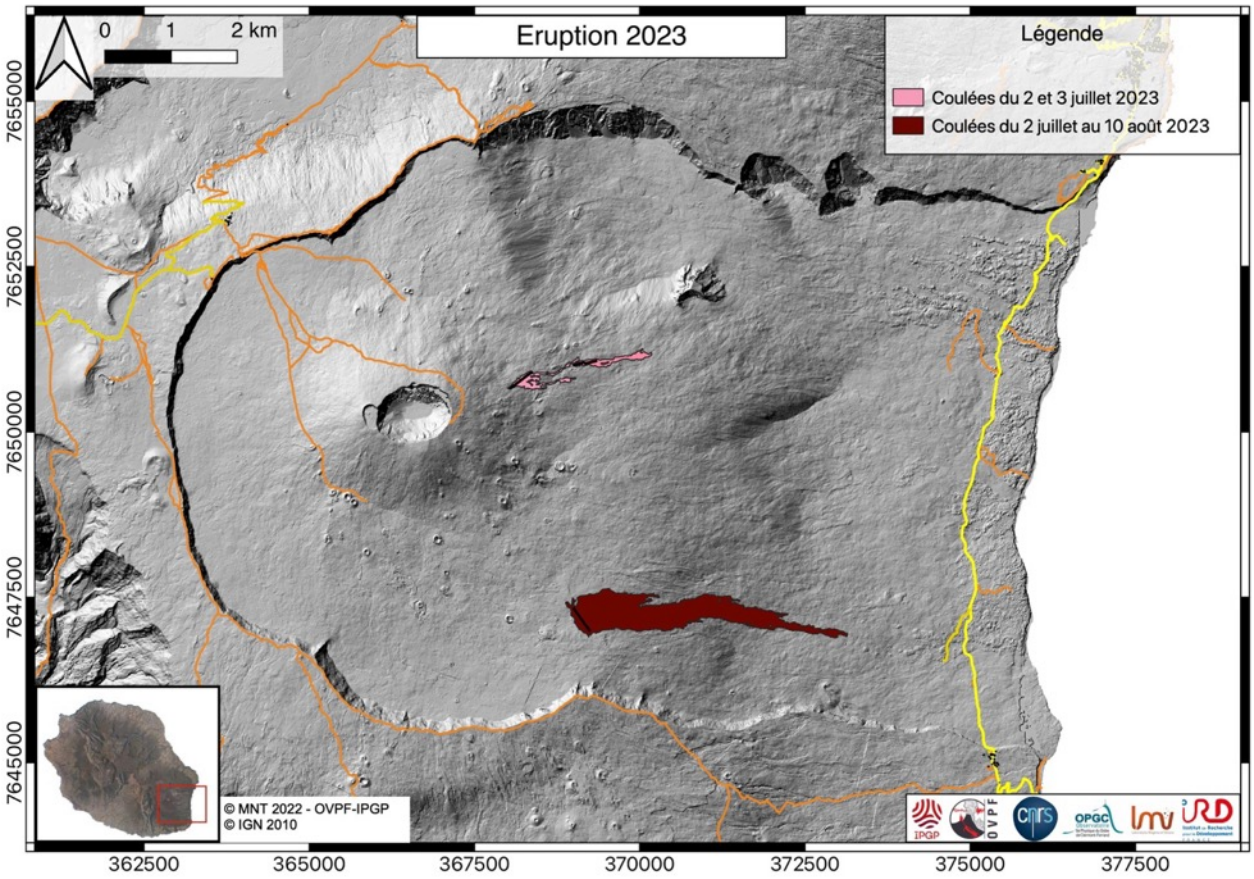

Figure 3 : Cartographie des coulées de lave émises lors de l'éruption du 2 juillet – 10 août 2023.

- L'intrusion du 21 avril 2023

L'augmentation de la sismicité superficielle sous le sommet à partir du 30 mars 2023 et l'inflation (gonflement) de l'édifice volcanique débutée début mars 2023, furent les marqueurs d'une réalimentation et d'une pressurisation du réservoir magmatique superficiel par la remontée de magma profond. Cette réalimentation a conduit à l'intrusion du 21 avril 2023 (15h11 heure locale). Cette intrusion a été caractérisée par une crise sismique qui a duré 1h09 sans déformation significative de l'édifice. Elle 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 2 juillet – 10 août 2023

L'éruption débutée le 2 juillet 2023 a été précédée par une vingtaine de jours de sismicité superficielle sous la zone sommitale ainsi que par une reprise de l'inflation de l'édifice, témoignant de la mise sous pression du réservoir magmatique superficiel (localisé aux alentours de 1,5-2 km sous la surface). Le 2 juillet 2023, à 7h36 heure locale (3h36 UTC), une crise sismique, témoin de 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 rapidement la localisation de la sismicité et des sources de déformation a montré une migration du magma vers le flanc est du volcan. Les déplacements de surface pluri-décimétriques, enregistrés par méthode GNSS (Global Navigation Satellite System) ou par interférométrie radar, ont atteint jusqu'à 75 cm de soulèvement sur le flanc est du cône terminal (cf. sections 5 et 7). Le trémor éruptif, synonyme d'arrivée du magma proche de la surface, est apparu vers 8h30 heure locale (4h30 UTC). Les cartes de trémor ont rapidement montré un maximum d'intensité sur le flanc est du cône terminal, à proximité du Piton Voulvoul entre 2120 et 1990 m d'altitude (Figures 3 et 4 à gauche).

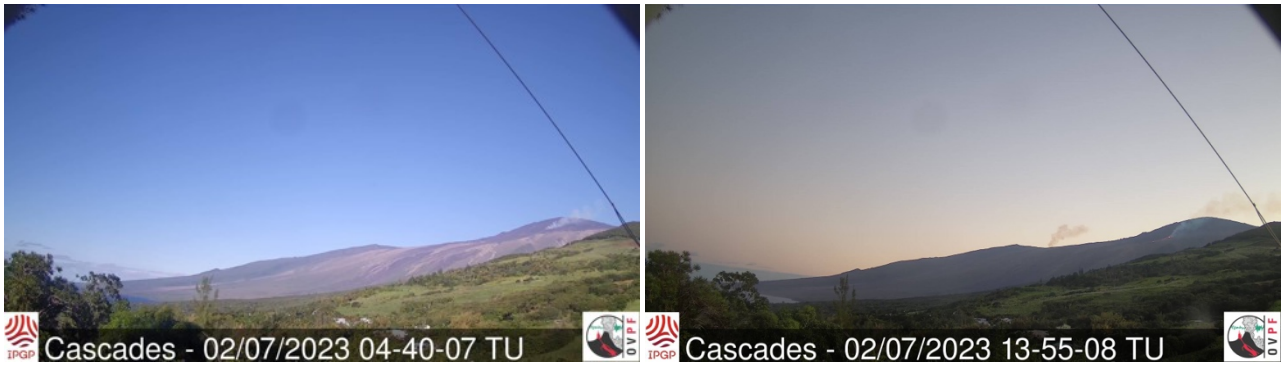

Figure 4 : Prises de vue des site éruptifs actifs le 02/07/2023 (les heures indiquées sont en heure UTC ; heure locale = heure UTC + 4). Images prises depuis la webcam « Cascades »de l'OVPF-IPGP située à Gros Piton (©OVPF-IPGP).

L'amplitude du trémor a augmenté fortement en début d'éruption avant de chuter comme cela est observé habituellement lors des premières heures d'éruption au Piton de la Fournaise. Entre 11h45 heure locale (7h45 UTC) et 12h30 heure locale (8h30 UTC), seul un trémor résiduel était enregistré alors que plus aucune activité de surface n'était visible. Le trémor a de nouveau augmenté à partir de 12h30 heure locale avec une source du trémor localisée à plus basse altitude, correspondant à l'ouverture de nouvelles fissures éruptives dans le prolongement de la précédente (Figure 3).
Ce sont au final deux nouvelles fissures en échelons qui se sont ouvertes entre 1850 et 1750 m d'altitude (Figures 3 et 5).

Figure 5 : Prises de vue des deux fissures éruptives qui se sont ouvertes le 02/07/2023 en contrebas de la première entre 1850 et 1750 m d'altitude (©OVPF-IPGP).

Suite au début de l'éruption une importante sismicité était toujours enregistrée – à la fois sous la zone sommitale et sous le flanc est – ainsi qu'une déformation du sol sur la station GNSS « PVDG ; Piton Parvedi » de l'OVPF-IPGP (située sur le flanc est sud-est du volcan à 1698 m d'altitude). La déformation enregistrée sur la station PVDG et la sismicité, indiquaient la poursuite de la propagation du magma en profondeur vers le sud-est. Vers 17h50 heure locale (13h50 UTC), une nouvelle fissure – de 500 m de long environ – s'est ouverte sur le flanc est sud-est du volcan, toujours à l'intérieur de l'Enclos Fouqué (Figures 3 et 4 à droite). L'ouverture de cette nouvelle fissure s'est traduite par une nouvelle augmentation du trémor éruptif avec une source localisée plus au sud-est du volcan (cf. section 4).

Lors du survol des deux sites éruptifs le 03/07/2023 aux alentours de 8h heure locale par une équipe de l'Observatoire volcanologique du Piton de la Fournaise l'activité éruptive avait cessé sur les trois premières fissures ouvertes sur le flanc est. Seul un dégazage des fissures éruptives était observé. Le front de coulée associé à ces fissures avait stoppé sa progression vers 1470 m d'altitude après s'être propagé sur environ 2 km de long depuis le point le plus haut de la première fissure (Figure 3). L'activité éruptive de surface se focalisait sur la fissure ouverte sur le flanc sud-est du volcan avec une activité de fontaine de lave encore soutenue sur toute sa longueur (Figure 6).

Figure 6 : Prises de vue du site éruptif situé au sud-est de l'Enclos Fouqué à 8h15 heure locale le 03/07/2023 (©OVPF-IPGP).

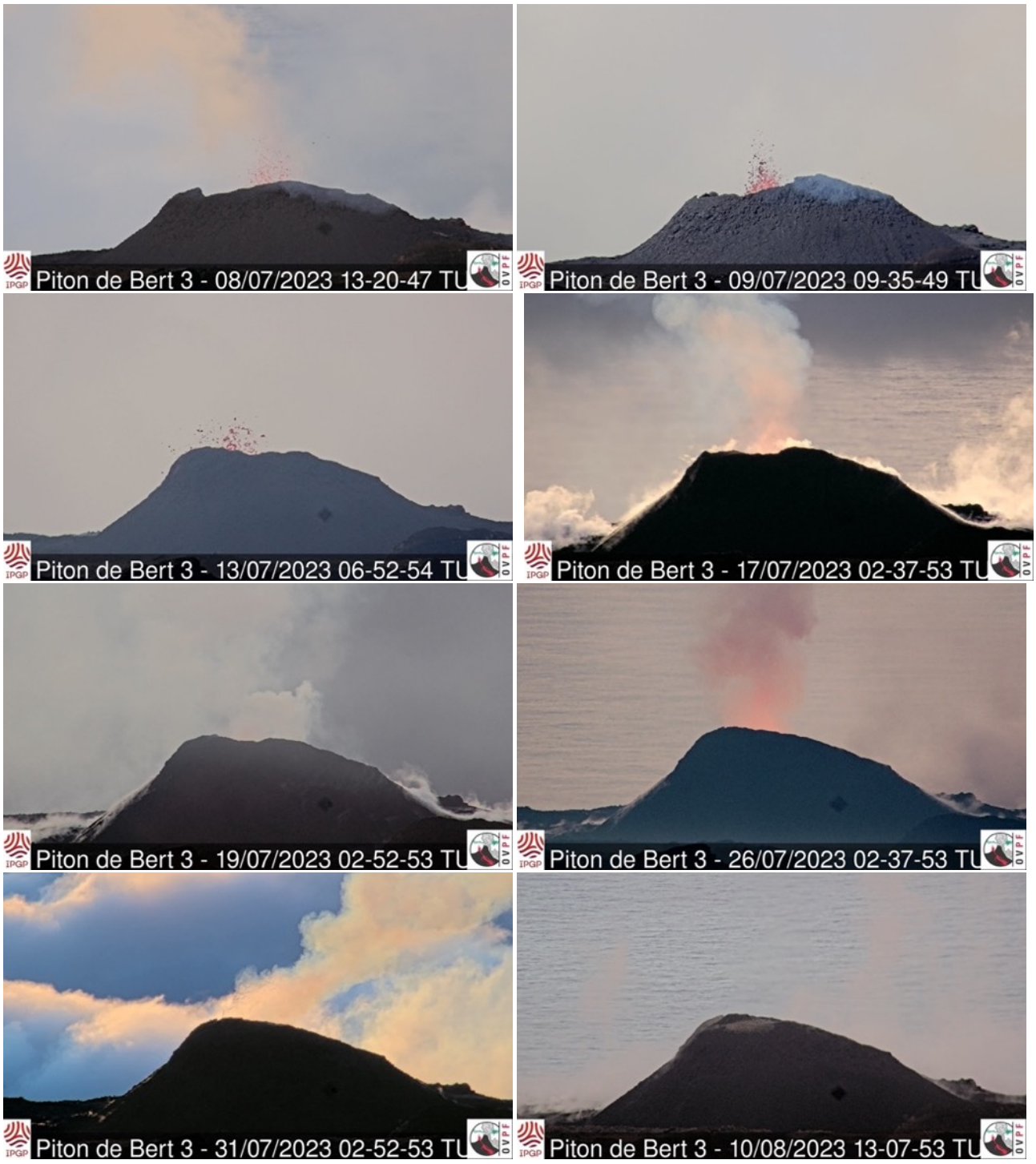

Figure 7 : Prises de vue du site éruptif situé au sud-est de l'Enclos Fouqué (les dates et heures indiquées sont en heure UTC ; heure locale = heure UTC + 4). Images zoomées depuis la webcam IRT-OVPF-IPGP située au Piton de Bert (©IRT et OVPF-IPGP).

A partir du 9 juillet, l'amplitude du trémor volcanique a montré des périodes de fluctuation au cours du temps à l'échelle de quelques dizaines de minutes, avec des phases de trémor continu et des phases de trémor intermittent (dit « gaz-piston »). Les fluctuations observées dans le trémor se sont traduites au niveau du site éruptif par des variations d'intensité dans l'activité, avec des projections de fontaines de lave plus ou moins intenses au niveau du cône éruptif (Figure 7).

Le trémor, et avec lui l'activité éruptive de surface, se sont arrêtés le 10 août aux alentours de 5h00 (heure locale, 1h00 UTC). L'éruption a émis un volume total de lave en surface d'environ 11,7 millions de m^3.

Le cône a été baptisé « Piton Guétali » par la Cité du Volcan, le Parc National de La Réunion et l'OVPF. Ce nouveau cône volcanique est situé à la limite des Grandes Pentes du Piton de la Fournaise, il domine le paysage littoral sud-est de l'île. De plus, par sa forme bien refermée, ce piton prend l'allure d'une tour de guet, une construction haute conçue pour guetter, observer les alentours. Dans l'architecture créole de La Réunion, ce type de construction est appelée un Guétali.

Anticipation et suivi des écoulements de lave

Comme pour chaque éruption au Piton de la Fournaise depuis 2018, l'étendue probable de la coulée de lave active a été modélisée suivant le protocole LAVA (Harris et al. 2017, 2019, Chevrel et al., 2022) ; impliquant la combinaison des modèles DOWNFLOW (Favalli et al., 2005) et FLOWGO (Harris and Rowland, 2001). Dans le cadre de ce protocole, 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 à jour si besoin lorsque la position de l'évent éruptif change ou suivant la fluctuation du débit.
Lorsqu'un relevé du contour de lave est disponible (obtenu par satellite ou par photo aérienne, voir section 7), 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 avec l'État-Major de Zone et de Protection Civile de l'Océan Indien (EMZPCOI).

Ainsi, le 2 juillet 2023, une première carte de simulation d'écoulement de la lave a été produite dès le début de l'éruption à partir de la localisation approximative du site éruptif déduit des données des instruments de l'OVPF (Figure 8). Cette carte a été délivrée à l'EMZPCOI à 9h44 (soit environ 1h après le début de l'éruption). Cette carte a permis à l'OVPF et à l'EMZPCOI d'écarter tous les scénarios où la lave pourrait atteindre la RN2 tant que les débits de lave restaient inférieurs à 30 m^3/s, et donc d'écarter une menace importante immédiate pour la RN2.

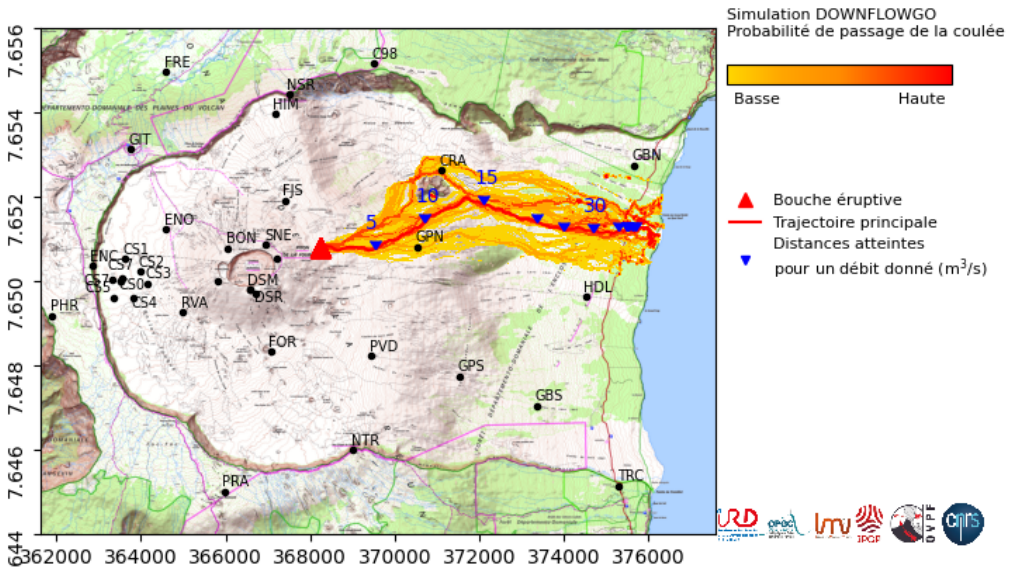

Figure 8 : Première carte (02/07/2023 – 9h44) des simulations numériques de la zone probable d'inondations de la coulée de lave produite à partir de la position approximative de l'évent 1h après le début de l'éruption sur un MNT (Modèle numérique de terrain) de 2020.

Lors de l'ouverture de la fissure éruptive sur le flanc sud-est du volcan vers 17h50, une nouvelle carte a été produite à partir d'une localisation approximative de la fissure déduite des enregistrements sismologiques de l'observatoire et transmise à l'EMZPCOI vers 21h40 (Figure 9).

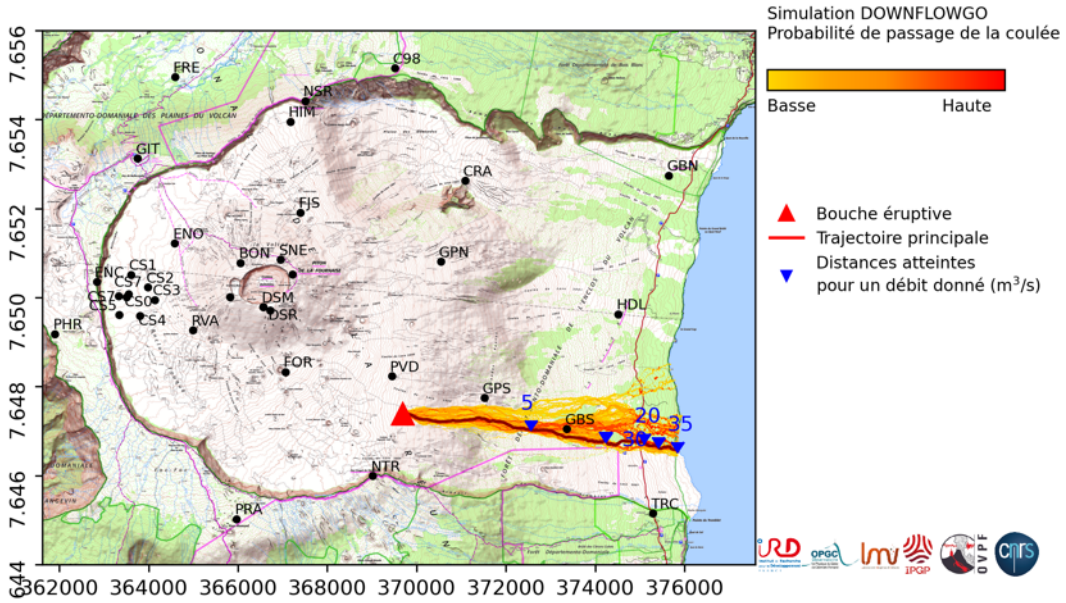

Figure 9 : Nouvelle carte (02/07/2023 – 21h40) des simulations numériques de la zone probable d'inondations de la coulée de lave à partir de la localisation approximative de la fissure ouverte sur le flanc sud-est.

Les premières images satellites ont permis de valider la localisation des évents éruptifs et d'obtenir une information sur le débit (16m^3/s, cf. section 7), permettant ainsi d'écarter la possibilité immédiate que les coulées atteignent la route. En revanche, ces cartes ont permis de montrer qu'une station de l'observatoire, GBS (cf. localisation sur les Figures 9 et 10), se trouvait directement sur la trajectoire de la coulée émise par l'évent éruptif situé au sud.
Une intervention héliportée le 3 juillet a permis à une équipe de l'OVPF de retirer les éléments les plus couteux de la station, de réaliser une reconnaissance terrain des évents éruptifs et de mesurer la position exacte du front des coulées. Une nouvelle carte a ainsi pu être produite et a permis d'identifier que le front de coulée n'avait avancé que de quelques mètres en 24h (entre le 03 et 04 juillet, Figure 10).

Grâce aux données satellites (images de cohérence InSAR et imagerie spatiale, cf. section 7), un suivi précis de l'évolution du champ de lave au cours de l'éruption a pu être réalisé (Figure 11). La carte montre que les simulations numériques (Figures 8, 9 et 10) ont permis une bonne anticipation de la trajectoire et de la zone recouverte par les coulées de lave (Figure 11).

Références :

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

Favalli, M., MT. Pareschi, A. Neri, I. Isola (2005), Forecasting Lava Flow Paths by a Stochastic Approach. Geophys. Res. Lett. 32(3): 1–4.https://doi.org/10.1029/2004GL021718

Harris, AJL., MO. Chevrel, D. Coppola, MS. Ramsey, A. Hrysiewicz, S. Thivet, N. Villeneuve et al. (2019), Validation of an Integrated Satellite-data-driven Response to an Effusive Crisis: The April–May 2018 Eruption of Piton de La Fournaise. Ann. Geophys. 61, https://doi.org/10.4401/ag-7972

Harris, AJL., SK. Rowland (2001), FLOWGO: A Kinematic Thermo-Rheological Model for Lava Flowing in a Channel. Bull. Volcanol, 63: 20–44, https://doi.org/10.1007/s004450000120

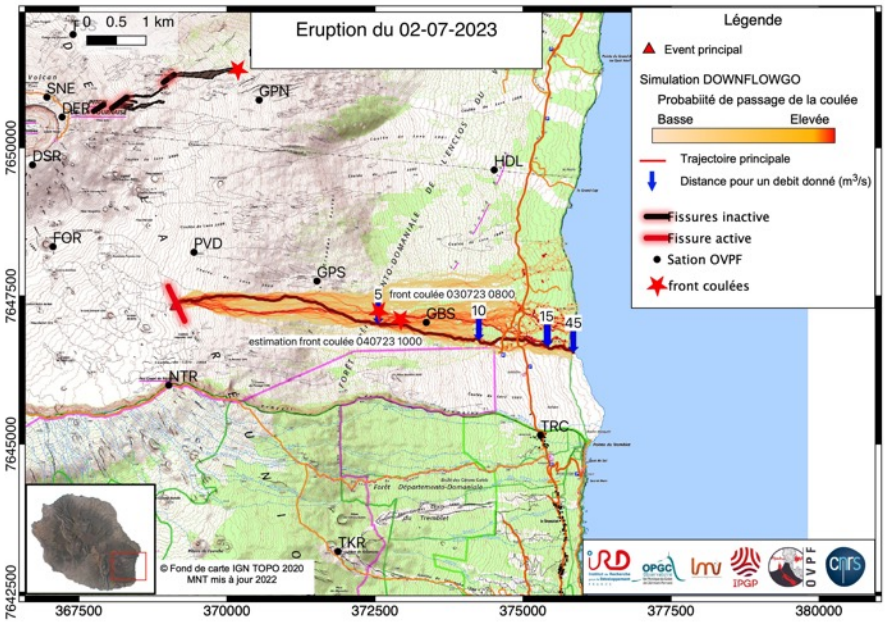

Figure 10 : Nouvelle carte (03/07/2023) des simulations numériques de la zone probable d'inondations de la coulée de lave à partir de la localisation exacte de l'évent éruptif au sud, et premiers contours de lave obtenus pour les fissures nord à partir d'images satellite (PlanetScope et Insar, cf. section 7).

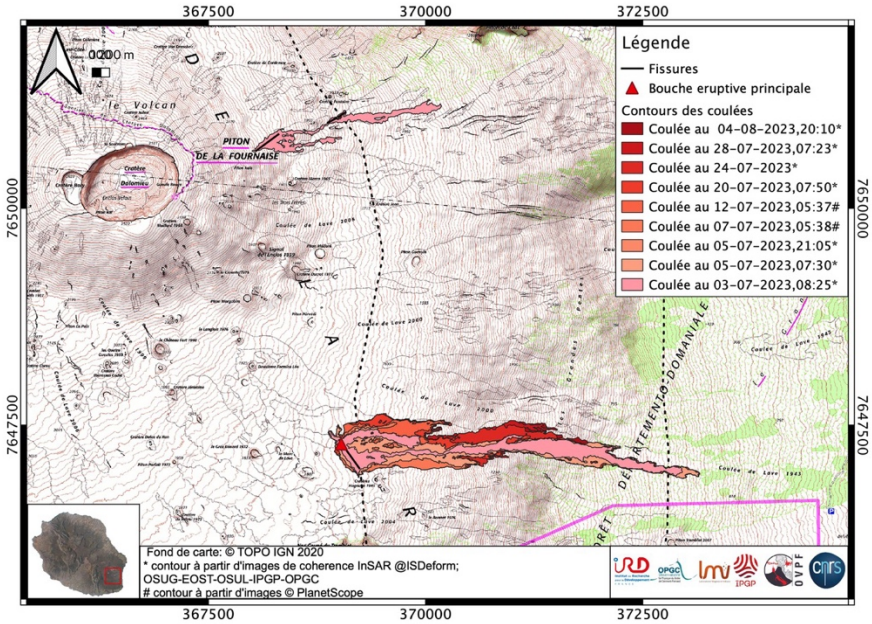

Figure 11 : Évolution de la coulée de lave cartographiée à partir de données satellites entre le 03/07/2023 et le 10/08/2023 (© ISDeform, OSUG-EOST-OSUL-IPGP-OPGC).

Les détails sur l'activité éruptive de 2023 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/

Cette activité s'est traduite pour les équipes de l'OVPF par :

▪ 661 heures d'astreintes renforcées (en complément des astreintes H24 classiques) ; 108 de ces heures ont été assurées avec le soutien de membres de l'IPGP basés à Paris.

▪ 56 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'observatoire (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, ainsi qu'auprès de Météo-France.

▪ 8 alertes en lien avec l'activité du volcan auprès de l'astreinte de l'État-major de zone et de protection civile de l'océan Indien – EMZPCOI (augmentation de sismicité, crises sismiques, début et fin de trémor éruptif, etc.).
Ces différentes alertes auprès de l'EMZPCOI ont conduit à 6 changements de niveau d'alerte prévu dans le cadre du dispositif ORSEC « Volcan du Piton de la Fournaise », par le préfet de La Réunion :

21/04/2023 – 15h45 : Passage en Alerte 1
24/04/2023 – 14h00 : Passage en Vigilance
02/07/2023 – 08h00 : Passage en Alerte 1
02/07/2023 – 08h50 : Passage en Alerte 2-1
10/08/2023 – 10h30 : Passage en Sauvegarde
31/08/2023 – 08h00 : Passage en Vigilance

Le tableau ci-dessous récapitule le nombre de jours pour chacun des niveaux d'alerte du dispositif ORSEC « Volcan du Piton de la Fournaise » en 2023 :

Vigilance	302 jours
Alerte 1	3 jours
Alerte 2-1	39 jours
Sauvegarde	21 jours

4. Sismicité

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

- ***Collaborations internationales principales*** : Eva Eibl (Université de Potsdam) ; C. Journeau (Université d'Oregon) ; T. Lecoq (ROB) ; M. Pischiutta (INGV)

> Le réseau sismologique de l'OVPF

Le réseau sismologique "PF" de l'observatoire volcanologique du Piton de la Fournaise est composé de 47 stations sismologiques représentant un total de 114 voies échantillonnées à 100 Hz transmises en temps réel à l'OVPF. Ce réseau comporte 32 stations large bande à 3 composantes, 2 stations 3 composantes courte période et 12 stations analogiques à 1 composante verticale (Figure 12).

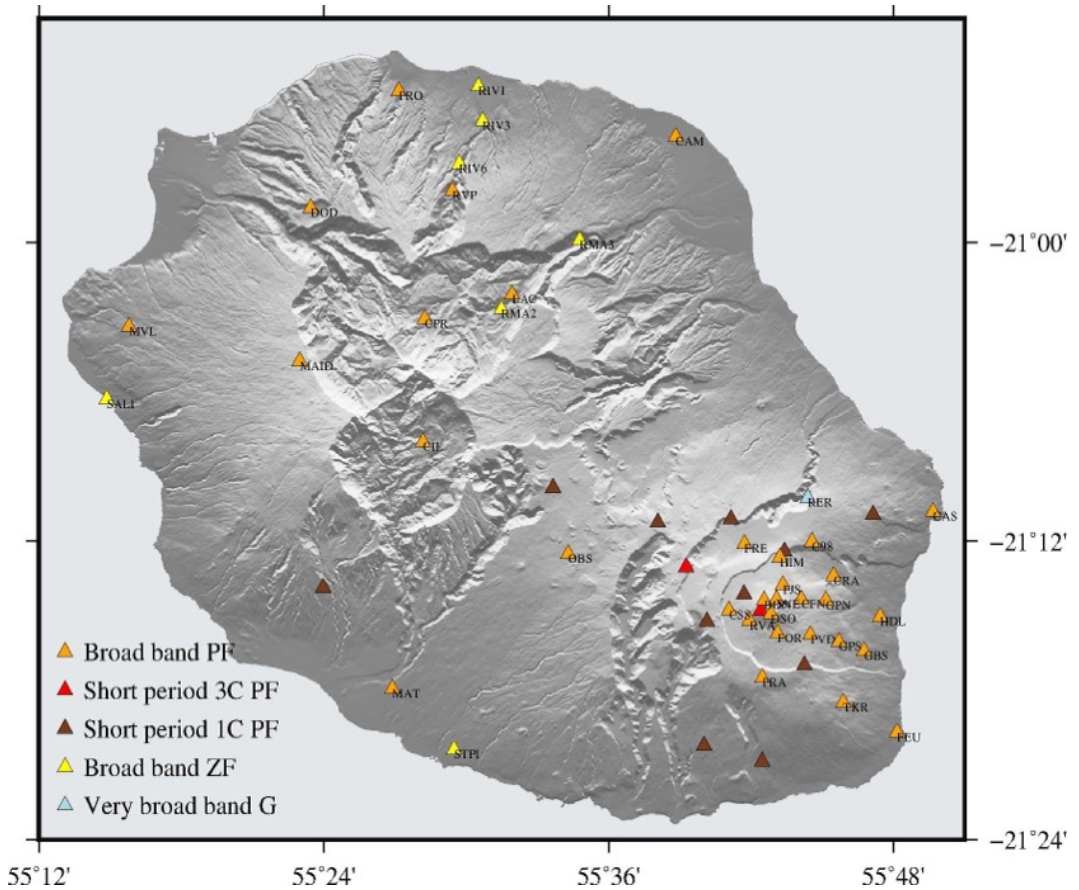

Figure 12 : Carte des réseaux sismologiques de La Réunion au 31 décembre 2023. Chaque triangle représente une station sismologique équipée d'un sismomètre large bande (Broad band), d'un capteur courte période (Short period) à 3 composantes (3C), ou vertical (1C). En complément des stations du réseau de l'OVPF (PF), est également représenté le réseau temporaire de la rivière des pluies (ZF) utilisé pour le suivi de la sismicité au nord de l'île.

L'année 2023 a été marquée par la réinstallation et la jouvence de plusieurs stations sismologiques (cf. section 8). En particulier, le sismomètre courte période à TKR (Takamaka) a été remplacé par un capteur large bande (Trillium Compact Posthole) permettant de mieux suivre la sismicité et l'éventuelle apparition de trémor lors d'intrusions au sud de l'Enclos Fouqué. La station du Flanc Est (FLR, détruite par une éruption en avril 2020) a été remplacée par la station Cratère Fontaine (CFN). En revanche, la station VIL (cratère Villèle, au sud de l'Enclos Fouqué) dont l'infrastructure a été détruite par une coulée en avril 2021 n'a pas encore pu être réinstallée. Un travail a également été effectué pour contrôler l'orientation des sismomètres en collaboration avec Martin Vallée de l'IPGP et dans le cadre du stage M2 de Lucile Costes (Figure 13). Ce travail a mis en évidence une erreur dans l'orientation azimutale de la station GPN d'environ 15° et de la station SNE d'environ 6°. Ces deux stations ont été visitées (respectivement le 06/09/2023 et le 31/01/2024) pour confirmer le problème d'orientation des capteurs et les réorienter correctement.

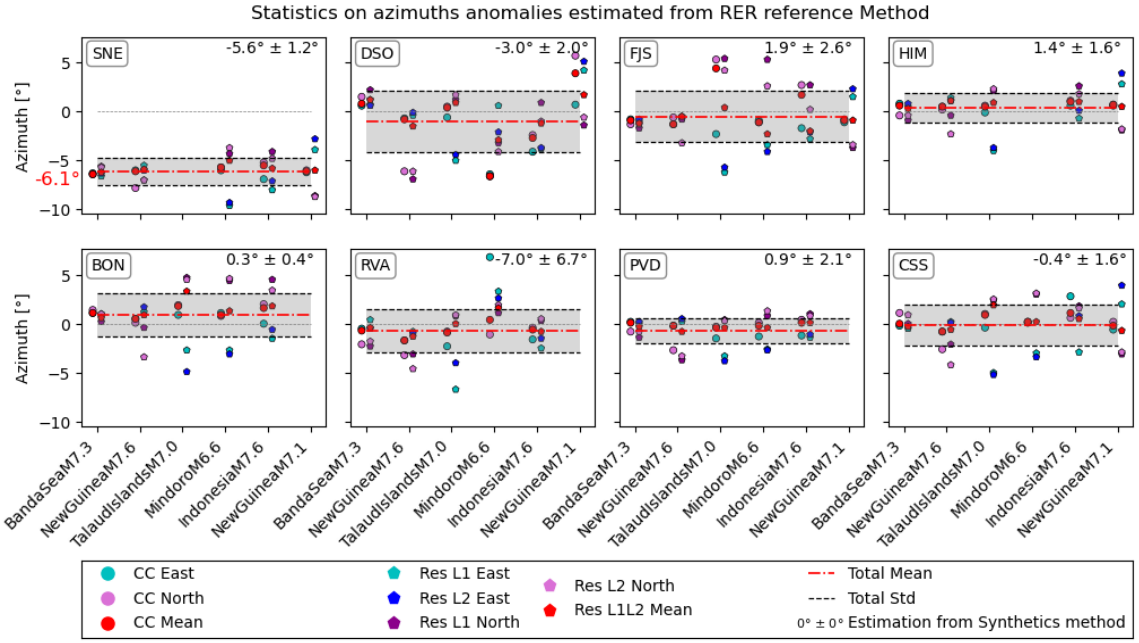

Figure 13 : Contrôle de l'orientation des sismomètres pour 6 téléséismes (évènements indiqués en abscisse). L'approche employée est basée sur la cohérence des ondes S aux stations du réseau. L'azimut est obtenu en trouvant l'angle de rotation minimisant les différences de forme d'onde sur les composantes horizontales par rapport à la station Geoscope RER (précédemment orientée au géocompas). La comparaison des signaux est effectuée avec différentes métriques (coefficient de corrélation CC, norme L1, norme L2). La barre grise représente l'écart type de ces mesures.

Une discussion est en cours concernant l'avenir de différentes stations et l'amélioration des données sismologiques produites. Ainsi, nous prévoyons de remplacer des instruments courte période par des sismomètres large bande dans la continuité de ce qui a été effectué à TKR. Les candidats possibles pour cette jouvence sont les stations TTR, ENO, TEO, BLE, TXR, PER, PJR, PHR, BOR et PBR (cf. localisation sur la Figure 12). D'autres stations courtes périodes pourraient être désinstallées car elles n'améliorent pas significativement la couverture du réseau (par exemple NSR, NTR, LCR et PCR ; Figure 12). Des investigations sont en cours pour trouver des sites de meilleure qualité aux stations MAT, MAID et CAS. Un nouveau site a été testé à proximité de Bois d'Olive (au Club Modélisme du Sud) qui pourrait remplacer la station MAT. Plusieurs sites ont été testés aux alentours de l'observatoire du Maïdo pour remplacer la station MAID mais sans succès. Enfin, la région est de La Réunion est assez mal couverte par le réseau actuel (ce qui est souvent problématique pour suivre la sismicité sous le cirque de Salazie ; cf. Figures 12 et 15).

Les données sont disponibles en temps réel et via le protocole informatique « seedlink » sur le serveur du centre de données de l'IPGP (rtserveur.ipgp.fr; port TCP: 18000) et les fichiers de métadonnées 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.

> Activité sismique en 2023

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 (téléséismes de fortes magnitudes). En plus des séismes, l'observatoire enregistre d'autres types de signaux comme le trémor éruptif (lié au dégazage du magma proche de la surface), des éboulements rocheux, des ondes sonores liées aux orages, du bruit lié à l'activité anthropique (e.g., hélicoptères) ou à l'interaction entre l'océan et la terre solide (bruit microsismique).

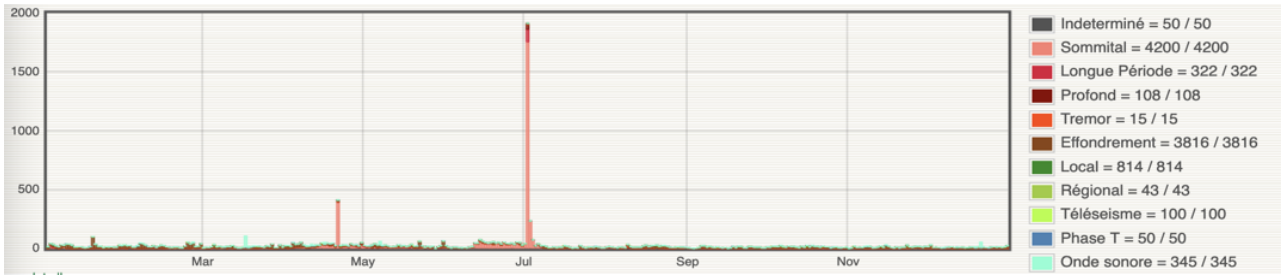

Figure 14 : Nombre d'événements par jour enregistrés dans la main courante sismique de l'OVPF en 2023.

Le dépouillement des données sismologiques a permis de détecter (Figure 14) :

- 4200 séismes volcano-tectoniques sommitaux (au-dessus du niveau de la mer, sous le sommet du Piton de la Fournaise)
- 322 séismes Longue Période (LP) ou très longue période (VLP) au niveau du Piton de la Fournaise
- 108 séismes volcano-tectoniques profonds (sous le niveau de la mer au Piton de la Fournaise)
- 814 séismes locaux (sous l'île de La Réunion et à moins de 200 km des côtes)
- 43 séismes régionaux (à des distances comprises entre 200 et 3000 km de l'île)
- 100 téléséismes (à plus de 3000 km de l'île)
- 3816 éboulements
- 345 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.

Sismicité locale

A l'échelle de l'île de La Réunion, on identifie plusieurs zones d'activité sismique (Figure 15). Cette sismicité locale est observée tout au long de l'année, avec jusqu'à 11 séismes par jour détectables sur les enregistrements de l'OVPF (Figure 16).

Sur la Figure 15, on distingue 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. La caractérisation fine de cette sismicité est effectuée dans le cadre de la thèse de Lise Firode et correspond principalement à l'activité d'une faille inverse localisée dans la croûte océanique (Firode et al., 2024 ; Figure 17).

Depuis fin 2022, on identifie également 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 (cf. Figure 12).

Plus au sud, on enregistre une activité relativement diffuse en profondeur sous la région des plaines. Sur la Figure 15, on distingue également l'activité sismique associée à l'activité du Piton de la Fournaise (discutée ci-dessous).

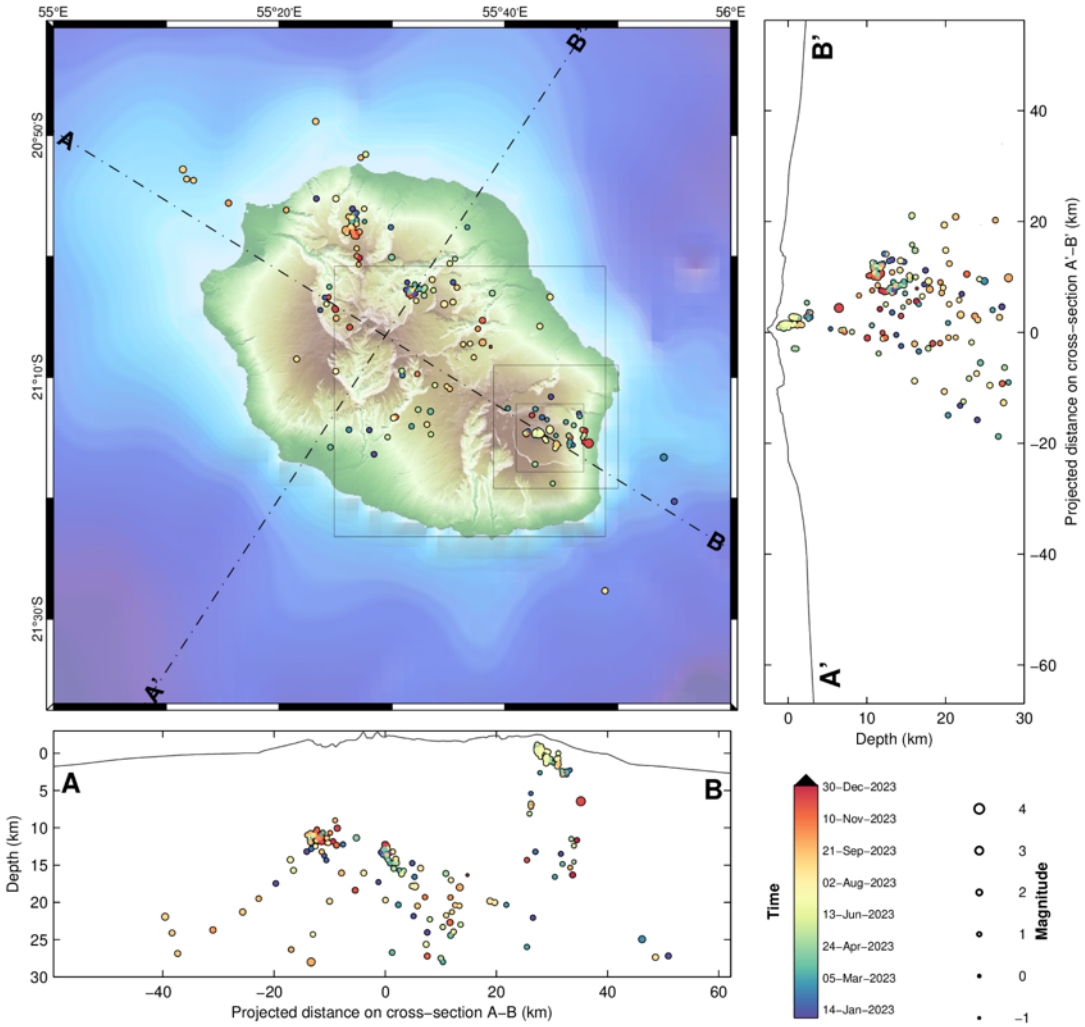

Figure 15 : Localisation des séismes au cours de l'année 2023. Chaque séisme est représenté par un cercle dont le diamètre dépend de la magnitude et la couleur indique la date du séisme. Le modèle de vitesse utilisé pour la localisation est un gradient de vitesse suivant la topographie. Seuls les séismes pointés manuellement sont présentés sur cette Figure, représentant environ 13% de l'ensemble des événements localisés au niveau de La Réunion.

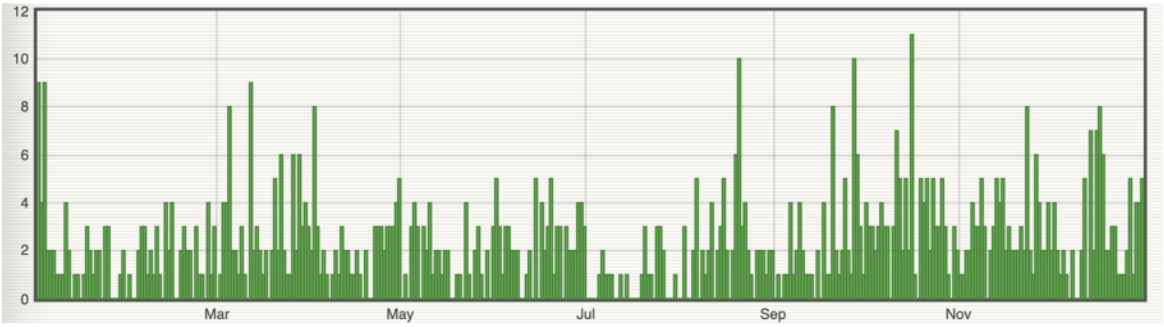

Figure 16 : Nombre de séismes locaux par jour en 2023, correspondant aux évènements localisés à moins de 200 km des côtes réunionnaises et en dehors de l'Enclos Fouqué.

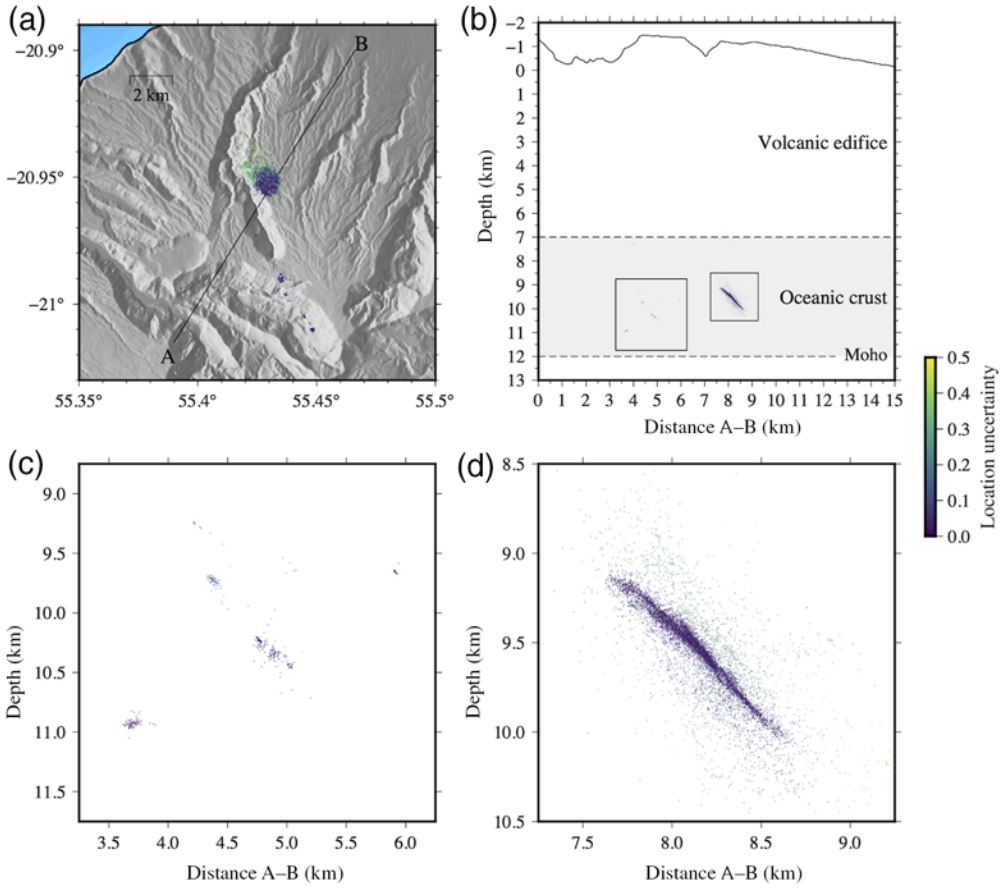

Figure 17 : Sismicité sous le flanc nord du Piton des Neiges (correspondant à la majorité des séismes locaux détectés à La Réunion en dehors de l'Enclos Fouqué). Les séismes présentés sur cette Figure ont été détectés par « template matching » et relocalisés par double différence dans le cadre de la thèse de Lise Firode à l'OVPF-IPGP. (a) Carte du catalogue relocalisé. (b) Sismicité projetée le long du profil A-B présenté en (a). La profondeur de la croûte océanique est tirée de Gallart et al. (1999) et de Fontaine et al. (2015). (c) Zoom sur les clusters secondaires (cadre en bas à gauche dans (b)). (d) Zoom sur le cluster principal (cadre en bas à droite dans (b)). Chaque séisme est représenté par un point dont la couleur représente l'incertitude de localisation associée (en km). Le cluster principal définit une structure plane qui penche au nord-est (strike~302° et dip~43°). Figure modifiée d'après Firode et al. (2024).

En 2024, quatre séismes ont été ressentis par la population et ont fait l'objet d'un communiqué spécifique de l'OVPF (Figure 18), ainsi que d'une diffusion auprès de FranceSéisme (https://www.franceseisme.fr/) afin que la population puisse témoigner sur une page dédiée de leur site.

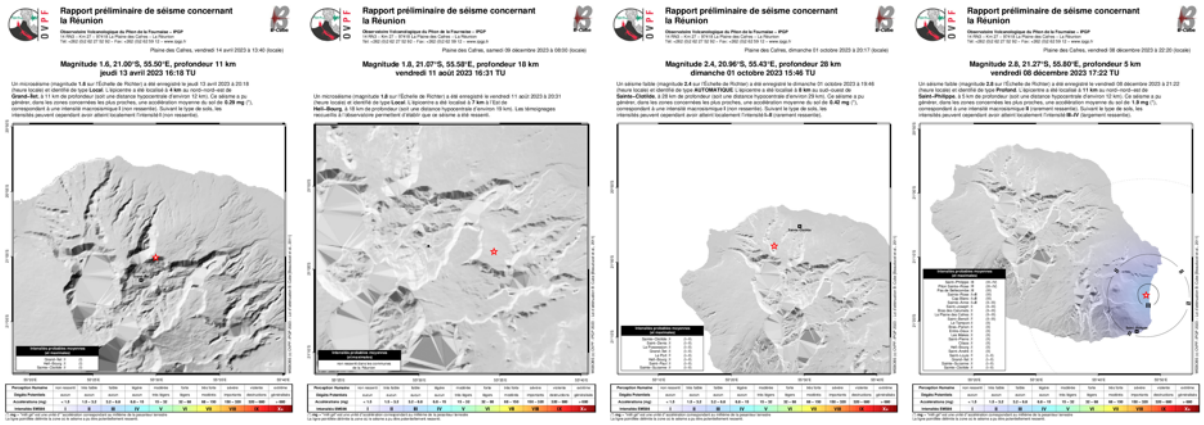

Figure 18 : Rapports concernant les 4 séismes ressentis à La Réunion en 2024.

Sismicité du Piton de la Fournaise

Différents types de signaux sismiques sont enregistrés au niveau du volcan du Piton de la Fournaise (Figure 19). La grande majorité des séismes correspond à des événements volcano-tectoniques (VT) sommitaux, localisés dans l'édifice volcanique au-dessus du niveau de la mer et sous les cratères sommitaux. Comme le montre la Figure 20, ces séismes sont principalement distribués sur un système de failles annulaires héritées des effondrements des cratères sommitaux comme en avril 2007 (Lengliné et al., 2016 ; Sapin et al., 1996). Cette structure annulaire est systématiquement activée au début des injections magmatiques depuis le réservoir superficiel sous la forme de crises sismiques. En 2023, deux crises sismiques se sont produites lors d'une intrusion - le 21 avril - et avant l'éruption du 2 juillet – 10 août. Ces crises sismiques se manifestent généralement sous la forme d'une migration de sismicité sur une partie de la faille annulaire, fournissant une indication sur la localisation du futur site éruptif par rapport au cône terminal (Duputel et al., 2019). La Figure 21 montre la relocalisation par double-différence des évènements lors de la crise sismique du 21 avril 2023. Les séismes y sont localisés sur la bordure sud-ouest du cratère Dolomieu indiquant une intrusion dans ce secteur. La Figure 22 montre la relocalisation par double-différence des évènements lors de la crise sismique précédent l'éruption du 2 juillet – 10 août 2023.

Figure 19 : Nombre de séismes volcano-tectoniques sommitaux (en haut), profond (au milieu) et longue période (LP) ou très longue période (VLP) (en bas) détectés en 2023 au Piton de la Fournaise.

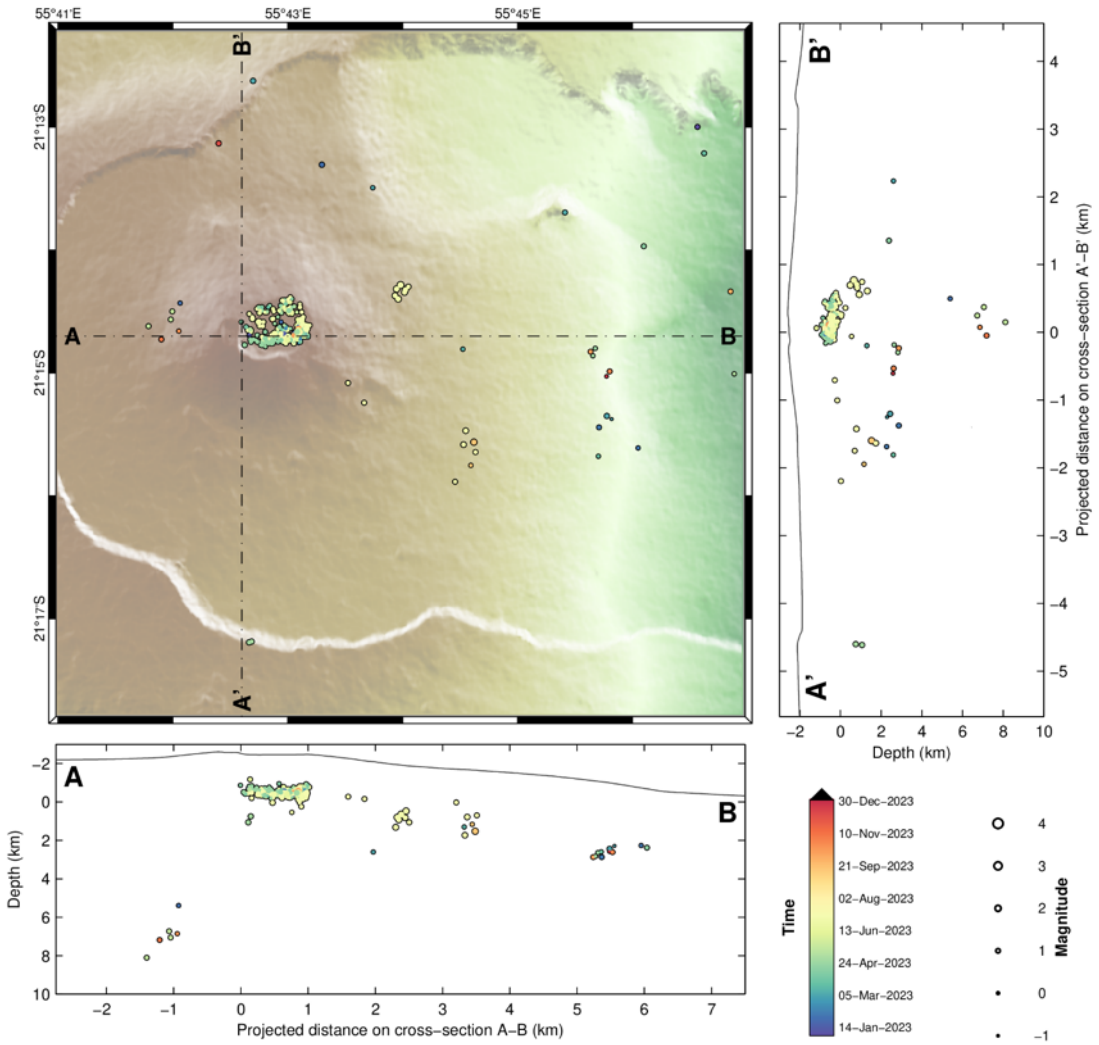

Figure 20 : Localisation des séismes à l'échelle de la caldera de l'Enclos Fouqué en 2023. Chaque séisme est représenté par un point dont la taille dépend de la magnitude et sa couleur indique le temps origine. Cette carte ne présente que les séismes détectés et localisés manuellement par l'OVPF (représentant environ 11% des séismes détectés au niveau de l'Enclos Fouqué).

Sur la Figure 20, on distingue également quelques séismes VT profonds sous le réservoir (à savoir sous le niveau de la mer) et sous le flanc-est du volcan. On note en particulier une sismicité sous le flanc-est suite à l'éruption du 2 juillet 2023, associée à l'ouverture de plusieurs fissures éruptives dans le secteur (Figure 19 et cf. section suivante).

Enfin, quelques séismes longue période (LP) ou très longue période (VLP pour "Very Long Period") ont été détectés en 2023. En particulier, un essaim de signaux VLP a été enregistré lors de la crise pré-éruptive du 2 juillet 2023 (Figure 19). Cet épisode est moins marqué que l'essaim de signaux VLP observé avant l'éruption du 19 septembre 2022. Des signaux similaires ont été détectés lors d'autres éruptions au Piton de la Fournaise et sur d'autres volcans (Duputel et al., 2023). Ils sont généralement interprétés comme la résonance de fissures remplies de fluides (magma ou fluides hydrothermaux). Certains de ces signaux peuvent également être associés à d'autres phénomènes comme des effondrements superficiels sous les cratères sommitaux (Zecevic et al., 2013).

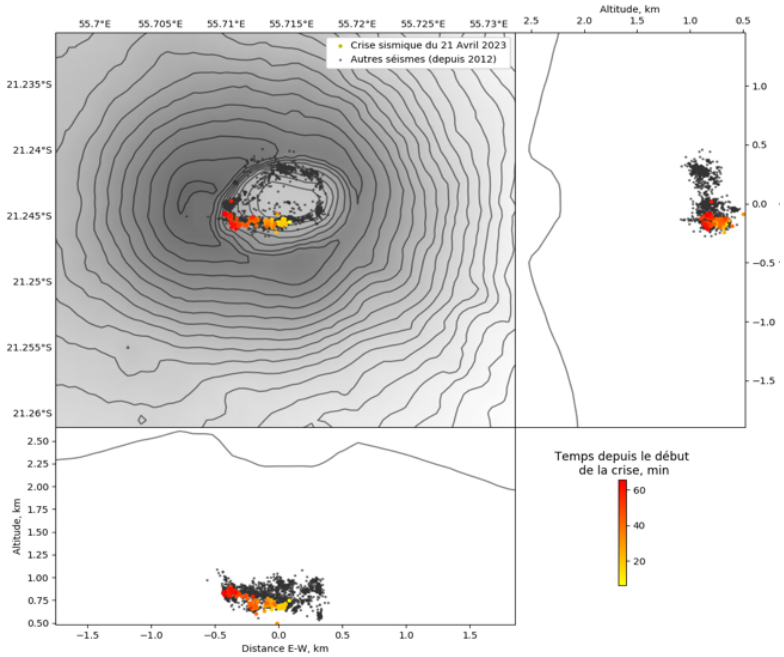

Figure 21 : Relocalisation automatique des séismes détectés par « template matching » lors de la crise sismique du 21 avril 2023. Les points gris représentent l'ensemble des séismes relocalisés depuis 2012. Les points en couleurs représentent les évènements pendant l'essaim sismique et le code de couleur indique le temps en minute depuis le début de la crise (11:06 UTC).

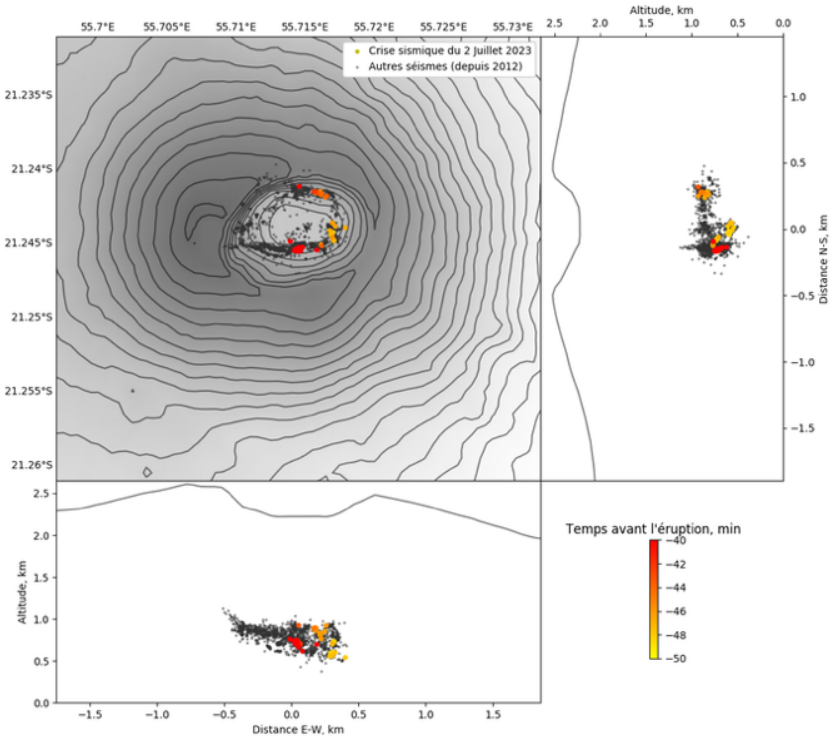

Figure 22 : Relocalisation automatique des séismes sommitaux détectés par « template matching » lors de la crise sismique du 02 juillet 2023. Les points gris représentent l'ensemble des séismes relocalisés depuis 2012. Les points en couleurs représentent les évènements pendant l'essaim sismique et le code de couleur indique le temps en minute avant l'ouverture de la première fissure à 4h30 UTC.

Suivi de l'éruption du 2 juillet – 10 août 2023

L'éruption du 2 juillet-10 août 2023 a été précédée par une crise sismique qui a débuté à 3h37 UTC. Lors de cette crise, les séismes ont été localisés au nord-est et au sud-est du cratère Dolomieu indiquant l'intrusion de magma dans ces secteurs (Figure 22). L'alerte "Jerk"* de la station Geoscope RER qui ne s'était pas manifestée lors de l'intrusion d'avril, a confirmé l'intrusion magmatique à environ 3h50 UTC (Figure 23).
Suite à ces précurseurs, l'apparition de trémor éruptif a mis en évidence l'ouverture d'une première fissure éruptive vers 4h30 UTC. Le trémor éruptif est généré par le dégazage de magma au niveau de l'évent éruptif. L'enregistrement de ce trémor par différents sismomètres permet une détermination rapide de la localisation du site éruptif et un suivi des variations de l'activité effusive en surface. La localisation du site éruptif est effectuée à l'OVPF via des cartes de trémor qui sont construites par interpolation des amplitudes mesurées ou via des lois d'atténuation des ondes sismiques (Battaglia et Aki, 2023 ; Taisne et al., 2011). Depuis quelques années ce suivi peut également être effectué avec la méthode COVSEISNET implémentée par Cyril Journeau (Journeau et al., 2020 ; 2023). La Figure 24 représente l'évolution du trémor enregistré par trois stations sismologiques sur le flanc est du volcan et les cartes de localisation COVSEISNET associées à différents intervalles de temps. Lors de cette éruption, on voit clairement l'ouverture d'une première fissure à mi-distance des stations FJS et GPN (vers 4h30 UTC), puis d'une deuxième fissure plus proche de la station GPN (vers 9h20 UTC) et finalement l'ouverture d'une troisième fissure plus au sud à proximité de la station PVD (augmentation du trémor à partir de 13h30 UTC et ouverture de la fissure éruptive visible sur les webcams de l'IPGP vers 13h50 UTC). Les fluctuations de l'amplitude du trémor visibles sur la Figure 24 sont aussi liées à différents facteurs tels que la variation du flux de lave émis, la construction d'un cône éruptif et la modification de sa géométrie au cours du temps.
Ces ouvertures tardives de fissures éruptives étaient anticipées étant donné l'observation d'une sismicité persistante après l'apparition du trémor. La Figure 25 montre en effet une migration des séismes du nord-est vers le sud-est après le début de l'éruption.

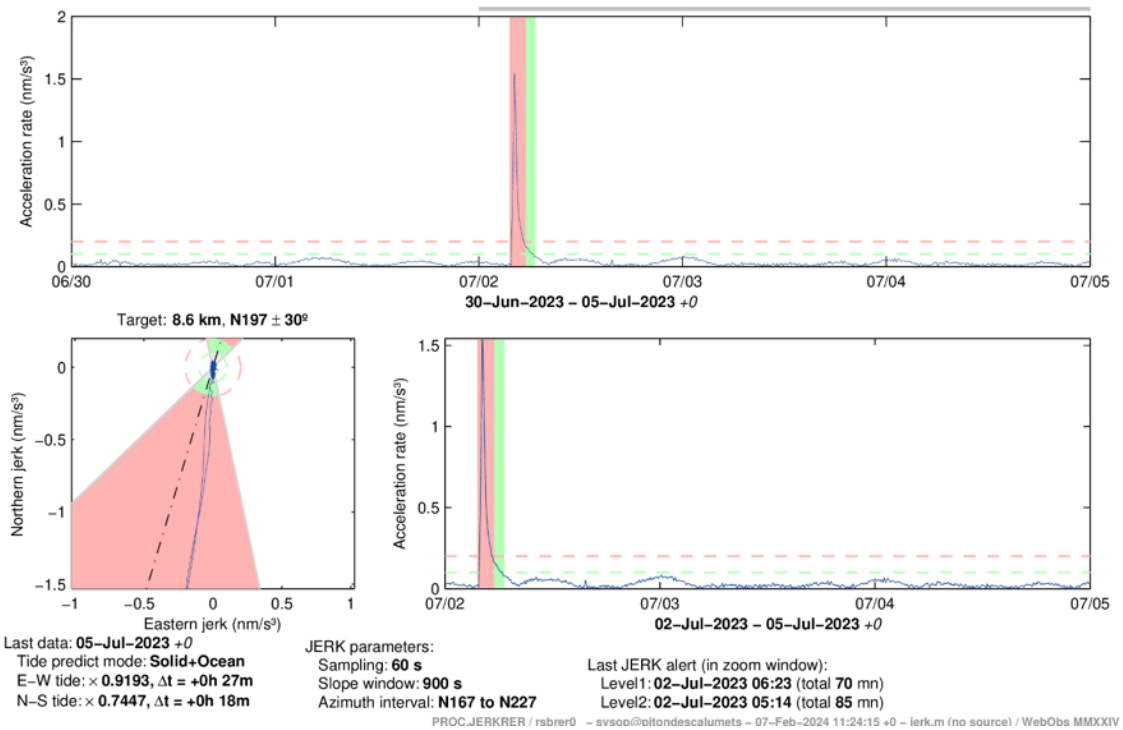

Figure 23 : Extrait de la page WebObs du Jerk pour l'éruption du 2 juillet 2023.*

** L'alerte « Jerk » est un système d'alerte basé sur l'accélération des signaux de la station sismologique RER du réseau Geoscope (station 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 de dikes ou de sills peu profonds.*

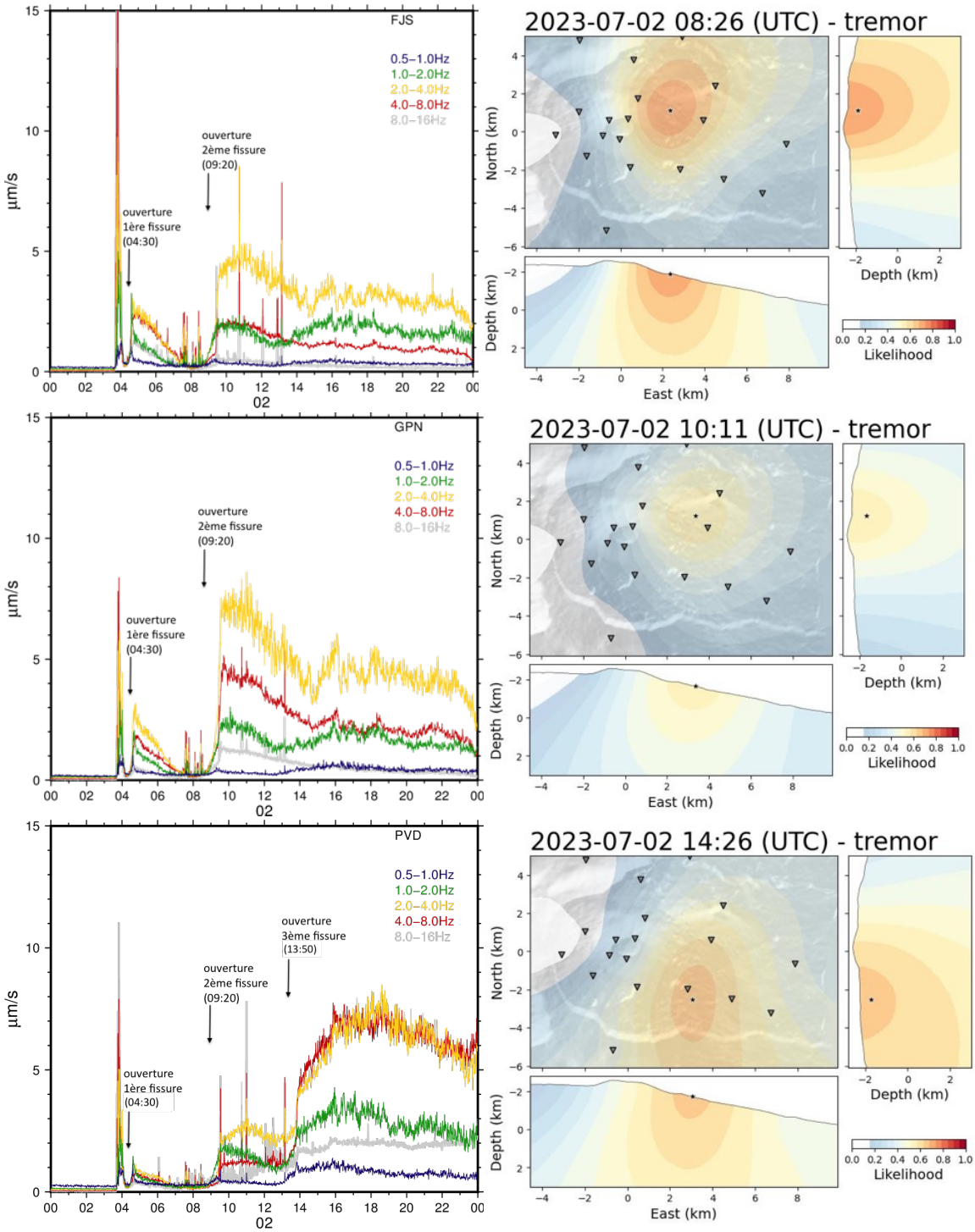

Figure 24 : Suivi du trémor éruptif le 2 juillet 2022. Les figures de gauche montrent l'évolution temporelle de l'amplitude du trémor éruptif sur trois stations à proximité des sites éruptifs. Les figures de droite représentent la localisation du trémor à différentes heures par la méthode COVSEISNET (implémentée à l'OVPF par C. Journeau). La localisation des stations FJS, GPN et PVD est indiquée sur la figure 12. Les heures sont en UTC.

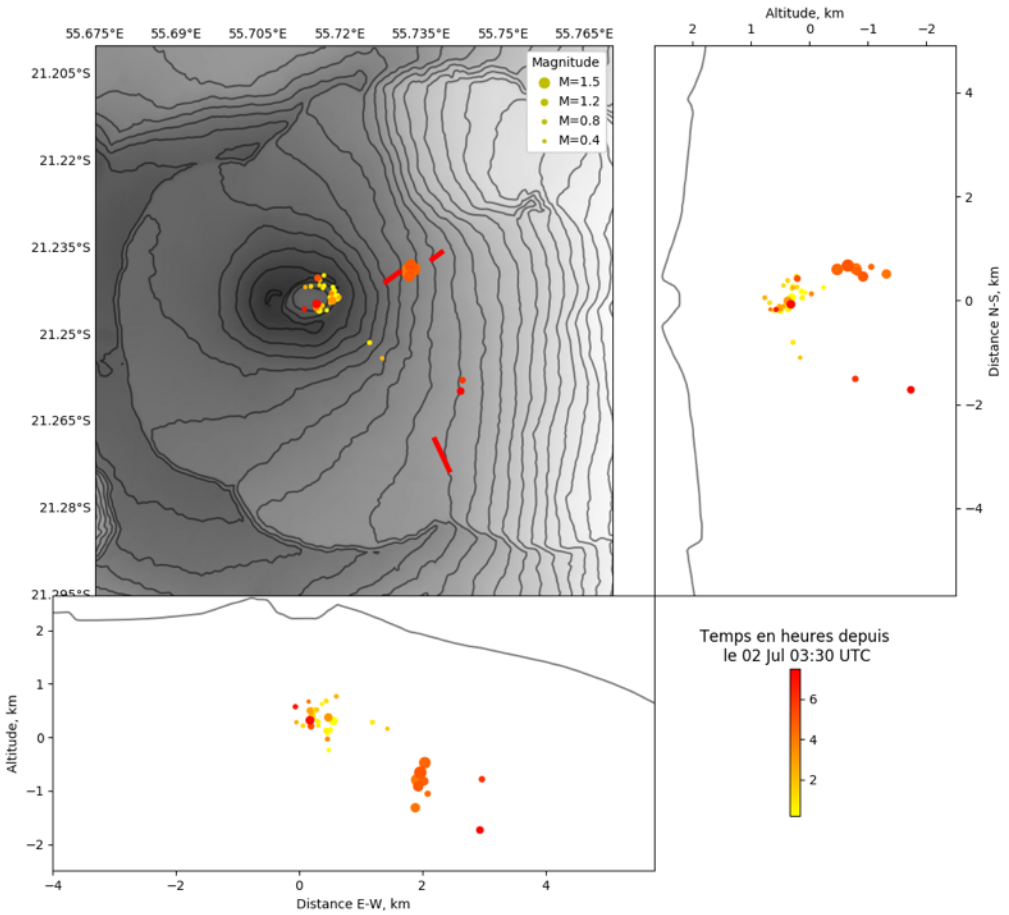

Figure 25 : Localisation manuelle des séismes par l'OVPF lors de la crise sismique du 2 juillet 2023, depuis 3h30 UTC. La première fissure au nord s'est ouverte vers 4h30 UTC (à +1h sur la figure), la deuxième fissure au nord s'est ouverte vers 9h20 UTC (à +5h50 sur la figure) et la troisième figure s'est ouverte plus au sud vers 13h50 UTC (à + 10h20 sur la figure). L'axe des couleurs a été limité à 0-9h pour mettre en évidence la migration de la sismicité sous le flanc est.

Références :

Battaglia, J., K. Aki (2003), Location of seismic events and eruptive fissures on the Piton de la Fournaise volcano using seismic amplitudes. Journal of Geophysical Research: Solid Earth (1978–2012), 108, https://doi.org/10.1029/2002JB002193

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

Duputel, Z., V. Ferrazzini, C. Journeau, P. Catherine, P. Kowalski, A. Peltier (2023), Tracking changes in magma transport from very-long-period seismic signals at Piton de la Fournaise volcano, Earth and Planetary Science Letters 620, 118323, https://doi.org/10.1016/j.epsl.2023.118323

Firode, L., Z. Duputel, V. Ferrazzini, O. Lengliné (2024), Seismicity under a Dormant Volcano: Unveiling Active Crustal Faulting beneath Piton des Neiges, La Réunion. Bulletin of the Seismological Society of America, https://doi.org/10.1785/0120230284

Fontaine, F.R., G; Barruol, H. Tkalčić, I. Wölbern,G. Rümpker, T. Bodin, M. Haugmard (2015), Crustal and uppermost mantle structure variation beneath La Réunion hotspot track. Geophys. J. Int. 203, 107–126, https://doi.org/10.1093/gji/ggv279

Gallart, J., L. Driad, P. Charvis, M. Sapin, A. Hirn, J. Diaz, B. de Voogd, M. Sachpazi (1999), Perturbation to the lithosphere along the hotspot track of La Réunion from an offshore-onshore seismic transect. Journal of Geophysical Research: Solid Earth (1978–2012) 104, 2895–2908, https://doi.org/10.1029/98JB02840

Journeau, C., NM. Shapiro, L. Seydoux, J. Soubestre, V. Ferrazzini, A. Peltier (2020), Detection, Classification, and Location of Seismovolcanic Signals with Multicomponent Seismic Data: Example from the Piton de La Fournaise Volcano (La Réunion, France). J. Geoph. Res. Solid Earth 125, e2019JB019333, https://doi.org/10.1029/2019JB019333

Journeau, C., NM. Shapiro, A. Peltier, V. Ferrazzini, J. Soubestre, Z. Duputel, A. Di Muro, C. Jaupart, D. Coppola (2023), Tracking changes in the co-eruptive seismic tremor associated with magma degassing at Piton de la Fournaise volcano. Journal of Volcanology and Geothermal Research 444, 107936, https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2023.107936

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, https://doi.org/10.1002/2016GL068383

Sapin, M., A. Hirn, JC. Lépine, A. Nercessian (1996), Stress, failure and fluid flow deduced from earthquakes accompanying eruptions at Piton de la Fournaise volcano. J. Volc. Geoth. Res. 70, 145–167, https://doi.org/10.1016/0377-0273(95)00043-7

Taisne, B., F. Brenguier, NM. Shapiro, V. Ferrazzini (2011), Imaging the dynamics of magma propagation using radiated seismic intensity. Geophys. Res. Lett. 38, L04304, https://doi.org/10.1029/2010GL046068

Zecevic, M., L. De Barros, CJ. Bean, GS. O'Brien, F. Brenguier (2013), Investigating the source characteristics of long-period (LP) seismic events recorded on Piton de la Fournaise volcano, La Réunion. J. Volc. Geoth. Res. 258, 1–11, https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2013.04.009

5. Géodésie

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

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

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

En 2023, le réseau permanent de surveillance de la déformation du Piton de la Fournaise comprenait :

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

Le réseau GNSS

En 2023, le réseau GNSS (Global Navigation Satellite System) permanent de l'OVPF comprenait un total de 27 stations permanentes : 26 sur le massif du Piton de la Fournaise [dont 10 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 26 et 27] et 1 au Maïdo, qui est une station OVPF / laboratoire du LACy de l'université de La Réunion.
Deux nouvelles stations ont été installées fin 2023 (CFNG sur le flanc est et TKRG à l'extérieur sud de l'Enclos ; cf. section 8). A noter que la station TKRG doit subir des réglages et des interventions supplémentaires sur le terrain en 2024, expliquant l'absence de données pour ce site en 2023. Cette station n'est donc pas prise en considération dans ce rapport (station non représentée sur les figures 26 et 27). En 2024, la mise en service du GNSS de TKRG portera ainsi à 28 le nombre de station de l'OVPF sur le massif du Piton de la Fournaise.

L'OVPF utilise également les données de (i) la station RGP de l'IGN, REUN (située le parc de 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 les 8 stations du réseau privé LéL@ (réseau de topographes de La Réunion) dont 2 des stations sont également incluses dans le réseau RGP (Figure 26).
A noter que suite à une défaillance sur le service de distribution FTP de Lél@, le traitement des données de 6 des 8 stations Lél@ - celles non incluses au réseau RPG – se fait de manière différée depuis avril 2023 à l'OVPF.

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

En 2023, le rapatriement des données horaires jusqu'à l'observatoire concernait 10 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/GLOBK, GipsyX - en remplacement de Gipsy depuis mi-2019). Les chaines de calculs GAMIT/GLOBK et GipsyX, complémentaires (rapidité de GipsyX et meilleure précision de GAMIT/GLOBK), 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).

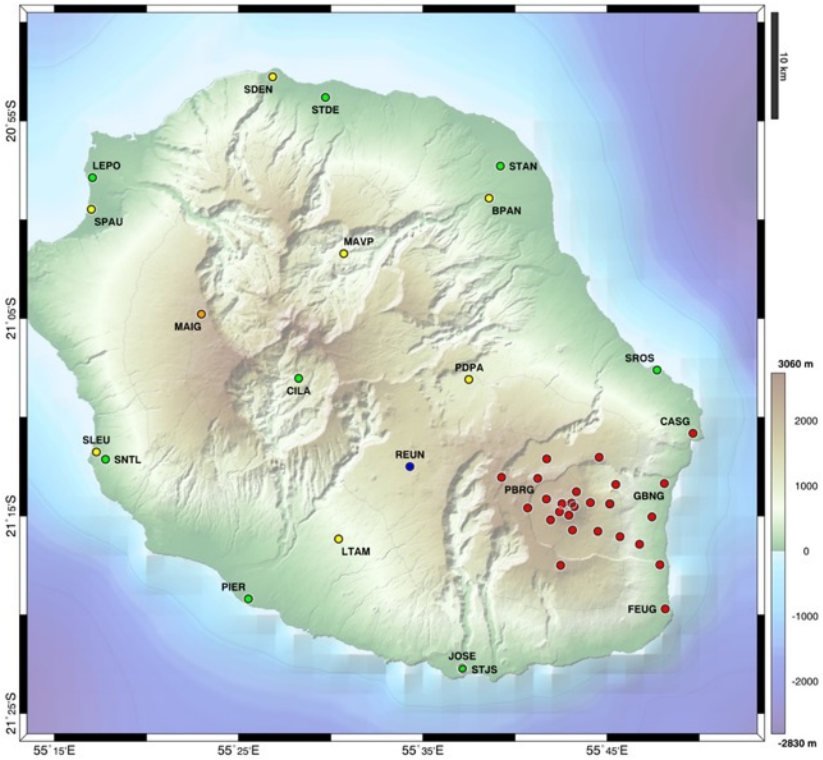

Figure 26 : Localisation des stations GNSS de l'OVPF et de ses partenaires sur l'île de La Réunion dont les positions sont calculées à l'OVPF en date du 31/12/2023. En rouge : les stations de l'OVPF, en orange : la station MAIG de l'OVPF/LACy, en jaune : les stations LéL@, en vert : les stations RGP, en bleu : la station REUN de l'IGN.

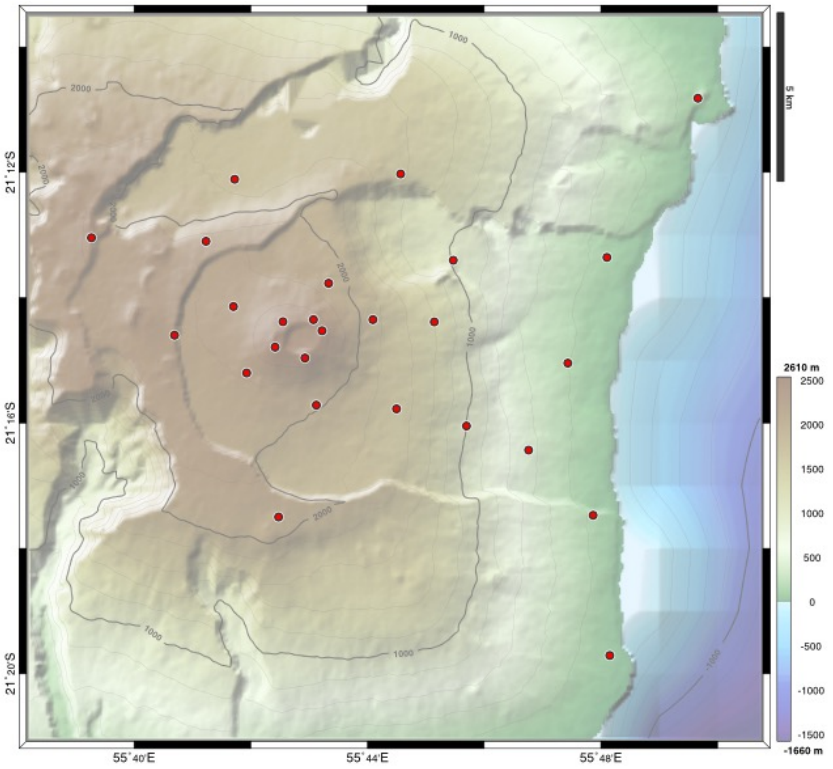

Figure 27 : Zoom sur la localisation des stations GNSS de l'OVPF dans et autour de l'Enclos Fouqué en date du 31/12/2023.

	1h	24h		24 jours	
	GipsyX/TRACK	**GAMIT/GLOBK**	**GipsyX**	**GAMIT/GLOBK**	**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 Vertical (V) : 10	H : 0.5 V : 2-2.5	H : 0.5-0.7 V : 2-3	H : 0.2 V : 1.5	H : 0.2-0.5 V : 1.5-2
Intégration Éphémérides GNSS	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	Quelques minutes	1-3 heures	Quelques secondes minutes / stations	1-3 heures	Quelques secondes minutes / stations
Mise à disposition des données	+ 1 heure	+ 1 jour et quelques heures	+ 1 jour et quelques 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 caractériser 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 2023 de (Figure 28) :

- 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 déployé sur 6 sites différents. Un nouveau couple d'inclinomètres Spectron a été installé en décembre 2023 (CFNI sur le flanc est ; cf. section 8 ; non représenté sur la Figure 28) mais leurs données ne sont pas encore exploitables (intervention technique sur le terrain à prévoir début 2024). A noter que les inclinomètres de la station FORI (à proximité du cratère Château Fort) sur le flanc sud sont actuellement hors service.

- 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. La station FORX sur le flanc sud est actuellement hors service (Figure 28).

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

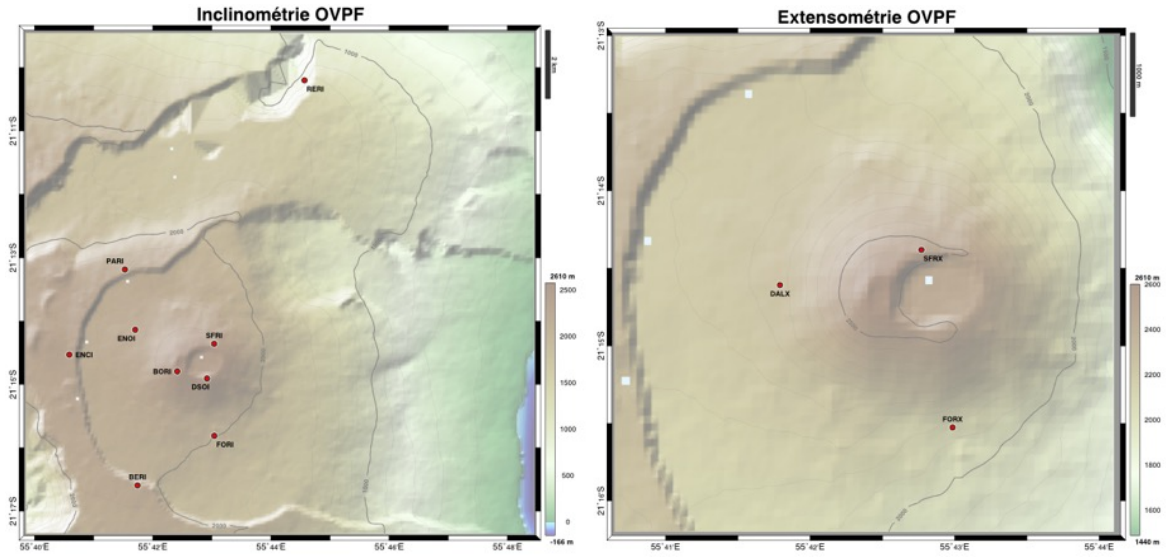

Figure 28 : Localisation des stations du réseau inclinométrique (à gauche) et extensométrique (à droite) de l'OVPF en date du 31/12/2023.

> Observation des déformations en 2023

Comme la majorité des éruptions au Piton de la Fournaise, l'éruption du 2 juillet – 10 août 2023 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).

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

L'année 2023 fut marquée par des périodes de déformations inter-éruptives à long terme de l'édifice quasi continues - entre début mars et début mai, entre mi-juin et début juillet, ainsi qu'au mois de novembre (Figure 29) - témoins d'une inflation de l'édifice.

Ces déformations sont lentes et faibles, jusqu'à 1,5 cm/mois maximum d'élongation au sommet et à la base du cône et jusqu'à 0,5 cm/mois d'élongation en champ lointain, à l'extérieur de l'Enclos Fouqué (Figure 29). 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 30 ; Peltier et al., 2009 ; Beauducel et al., 2020).

A noter que lors de l'éruption du 2 juillet – 10 août une inflation de l'édifice a également été enregistrée, de la mi-juillet à la mi-août (Figure 32), indiquant une re-pressurisation du système d'alimentation du volcan au cours de l'éruption avec possiblement le transfert de magma profond vers ce dernier, et expliquant ainsi la longue durée de l'éruption (39 jours).

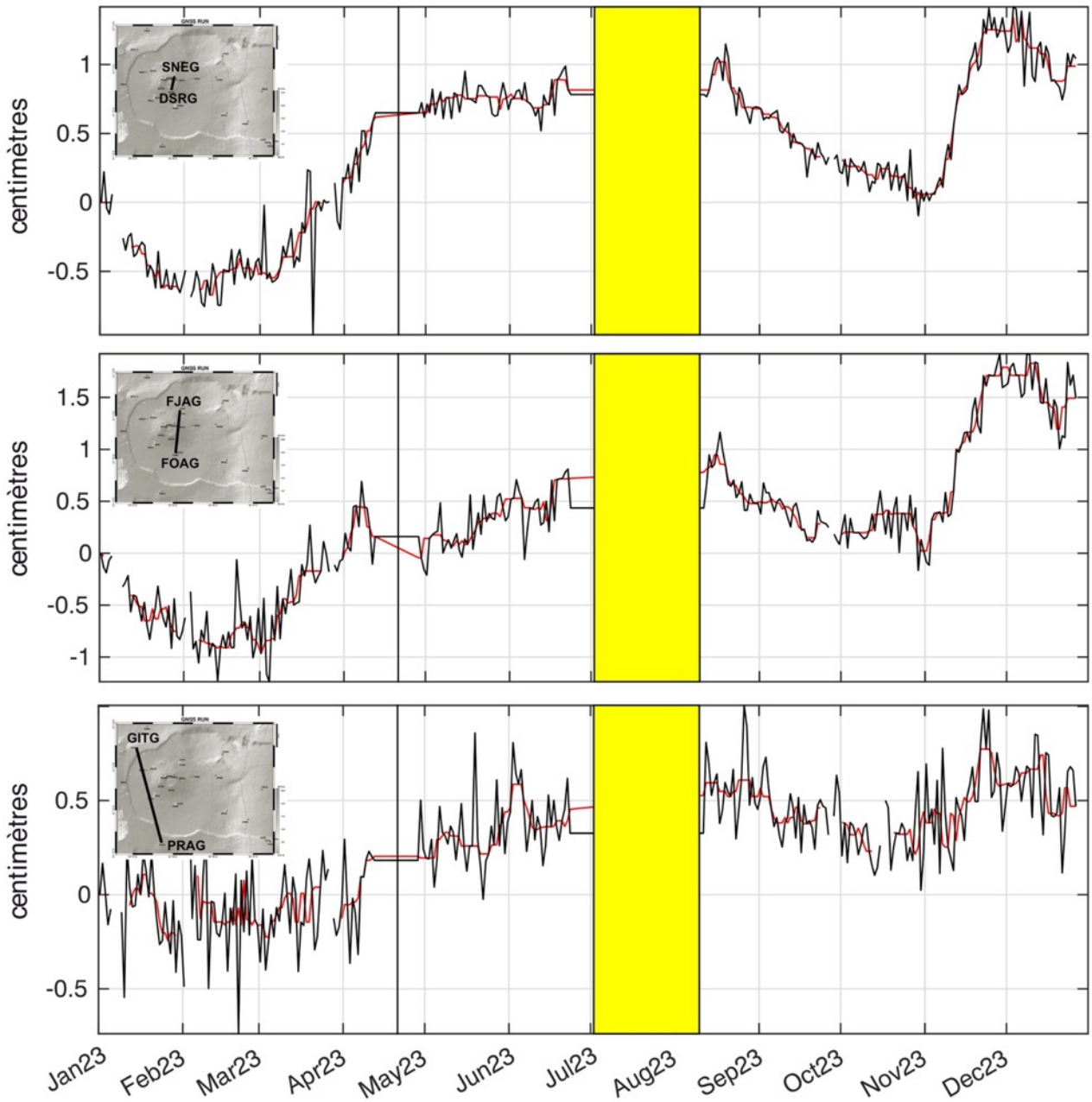

Figure 29 : Variation de la distance entre deux stations GNSS (lignes de base en cm) du sommet (en haut), de la base du cône (au milieu) et de l'extérieur de l'Enclos Fouqué (en bas) en 2023 (cf. localisation des lignes de base dans les encarts). Les courbes noires et rouges représentent respectivement 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.

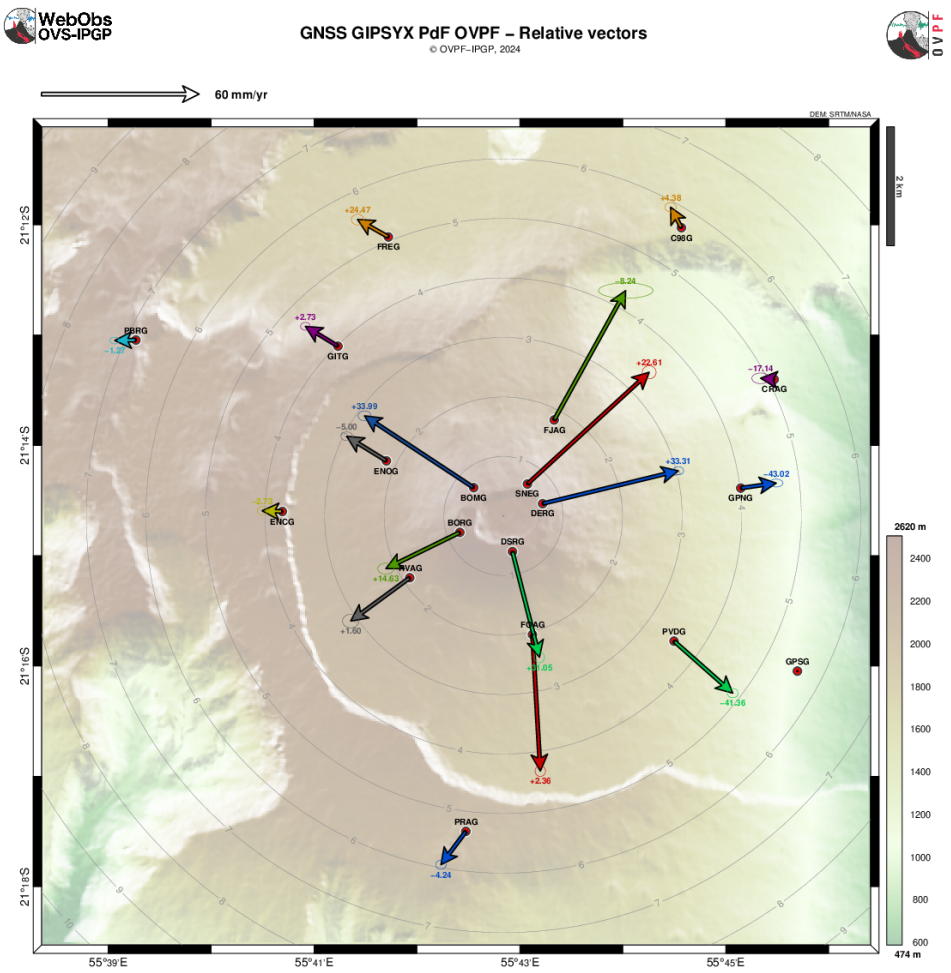

Figure 30 : Déplacements du sol (exprimés en vitesse) enregistrés sur les stations GNSS à l'intérieur et sur le pourtour de l'Enclos Fouqué entre le 1er mars et le 1er juillet 2023. Les déplacements horizontaux sont représentés sous forme vectorielle et les déplacements verticaux sont indiqués par les valeurs chiffrées en couleur. Les ellipses représentent les erreurs de la mesure. Sur cette figure, les données sont corrigées du mouvement de la plaque tectonique.

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 31). 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. Pour l'année 2023, le taux de subsidence reste similaire à celui observé l'année précédente avec une moyenne de 3,7 cm / an (Figure 31).

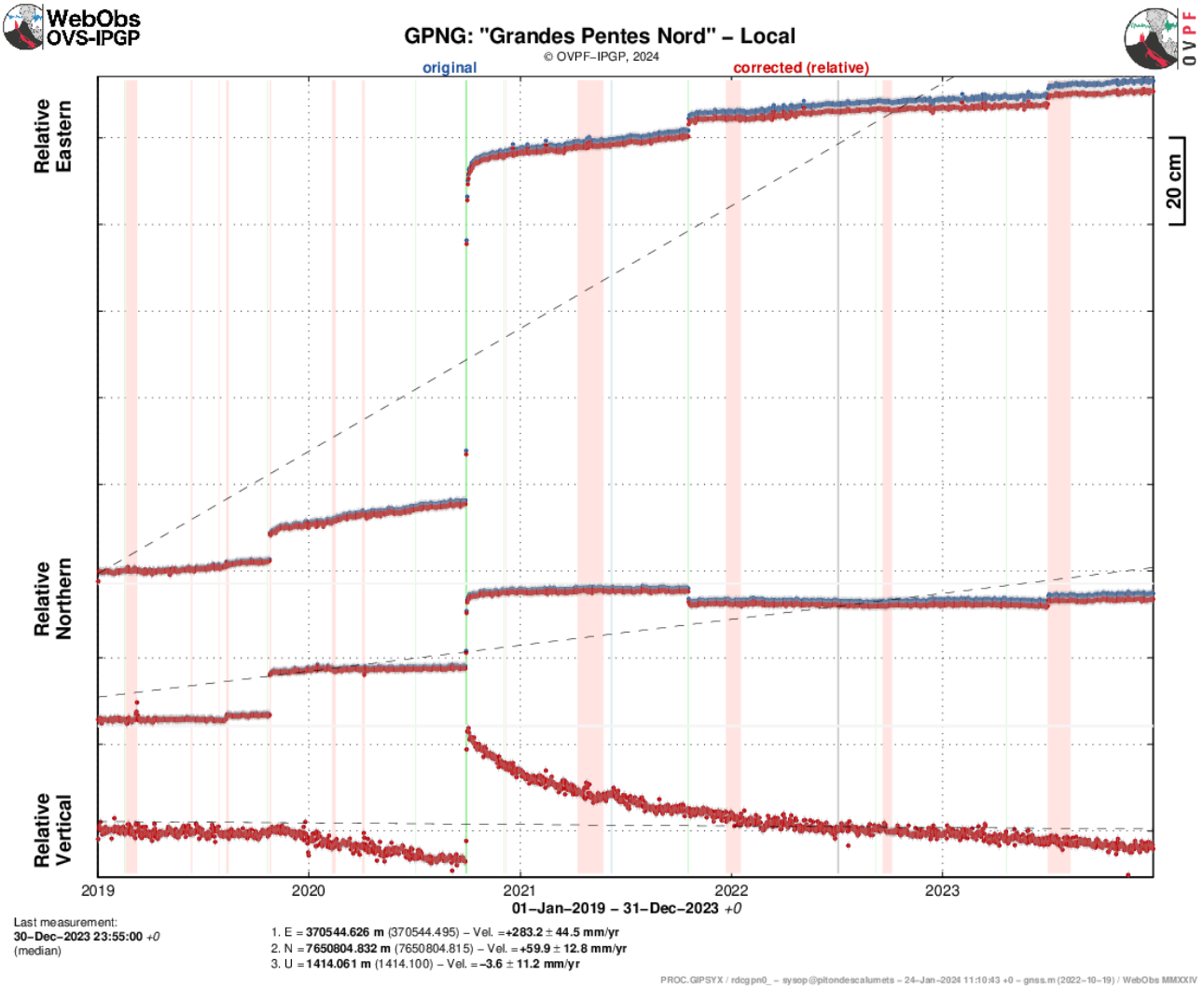

Figure 31 : Déplacements enregistrés sur la station GNSS "GPNG", localisée dans la partie haute et nord des Grandes Pentes à 1414 m d'altitude entre le 1er janvier 2019 et le 31 décembre 2023 (les périodes éruptives et intrusives sont représentées respectivement en rouge et vert). En bleu les données brutes, en rouge les données corrigées du mouvement de la plaque tectonique. (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 2023 par des déformations beaucoup plus rapides correspondant :
- à la propagation de magma vers la surface (ouverture de dike) qui a conduit à l'éruption du 2 juillet – 10 août 2023 (Figure 32),
- et à des phases de déflation de l'édifice, notamment au début de l'éruption liées à la vidange du réservoir de magma superficiel alimentant l'activité de surface (périodes en jaune sur la Figure 32),

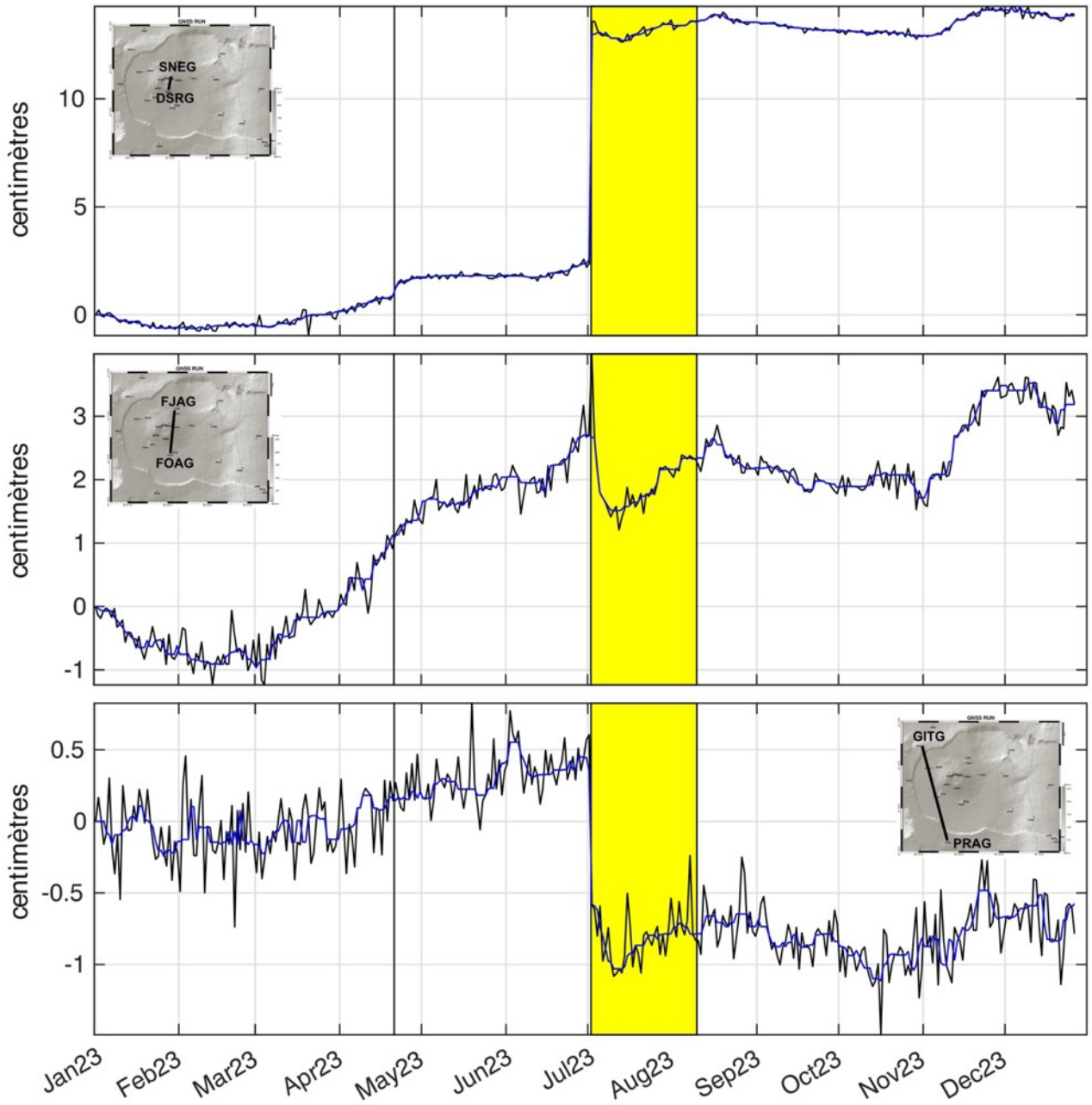

Figure 32 : Variation de la distance entre deux stations GNSS (lignes de base en cm) du sommet (en haut), de la base du cône (au milieu) et de l'extérieur de l'Enclos Fouqué (en bas) en 2023 (cf. localisation des lignes de base dans les encarts). Les courbes noires et bleues représentent respectivement 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 29, 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 2 juillet 2023, le réseau de GNSS permanents a enregistré des déplacements rapides notables de la surface, de l'ordre de la vingtaine de centimètres max. au niveau du cône terminal et de la trentaine de centimètres maximum au niveau du flanc sud-est (station PVDG).
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 (pluri-décimétriques) de part et d'autre de la trajectoire du dike (Figure 33).

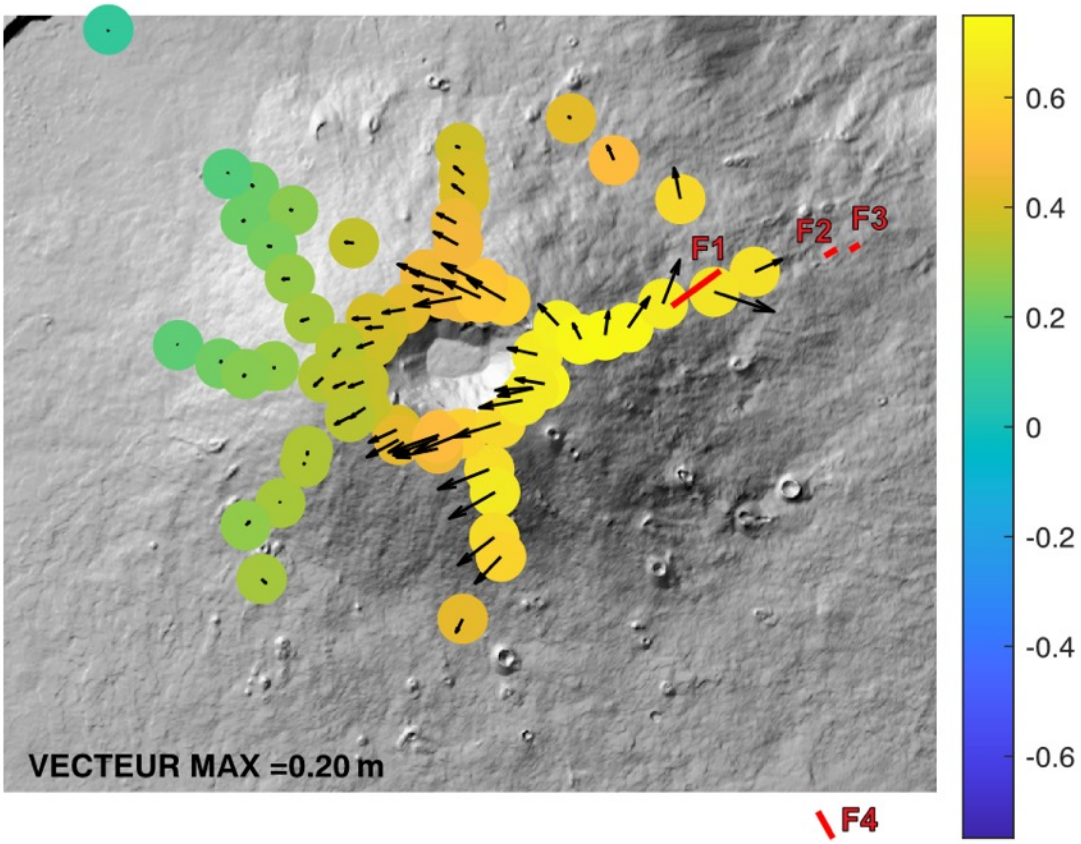

Figure 33 : Déplacements de surface enregistrés au niveau du cône terminal lors de campagnes de réitération GNSS sur le terrain encadrant l'éruption du 2 juillet – 10 août 2023. Les vecteurs représentent les déplacements horizontaux (échelle donnée par la valeur du vecteur maximum en bas à gauche) et 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 2 juillet 2023.

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 vers l'est-sud-est.

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 2 juillet – 10 août 2023 (Figure 34). 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 2 juillet que le flanc est du volcan était intrudé par le magma.

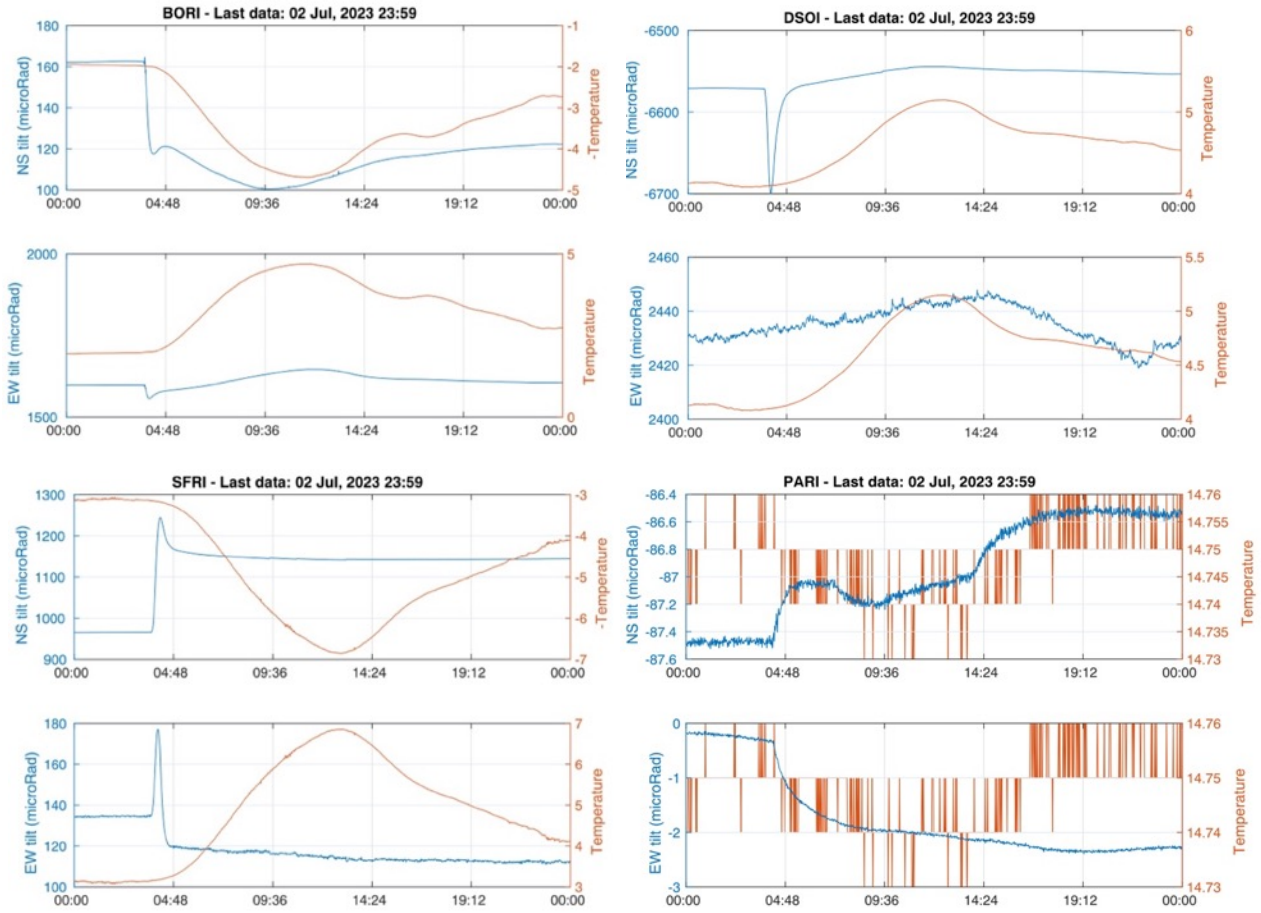

Figure 34 : Variations de pente (en microradians) enregistrées sur les stations sommitales BORI, DSOI, SFRI et sur la station PARI située sur la bordure nord de l'Enclos Fouqué (composante NS en haut et composante EW en bas) le 2 juillet 2023 (les heures sont en UTC). En rouge : la température à l'intérieur du coffret électronique. A noter que la composante EW de la station DSOI est hors service (capteur en butée ou oxydé).

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

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

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

> 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 35) et de l'instrumentation portable du même type.

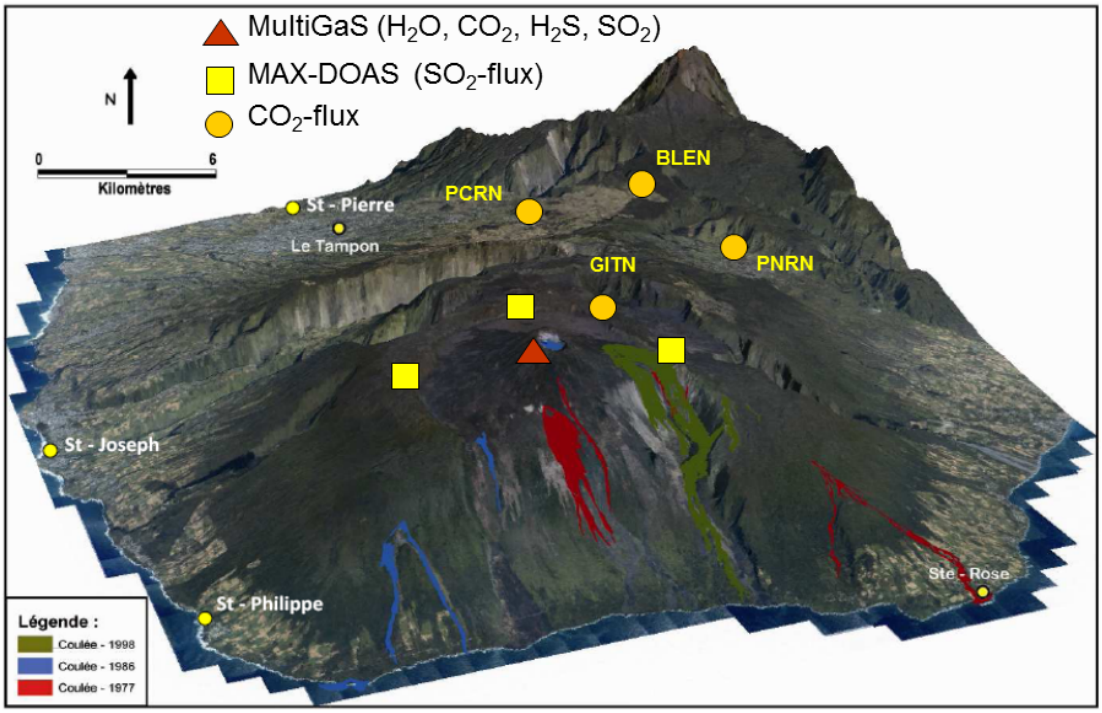

Figure 35 : Localisation des stations de l'OVPF pour le suivi géochimique des émissions gazeuses sur le massif du Piton de la Fournaise.

Les stations permanentes sont couplées à des capteurs qui permettent de quantifier les paramètres environnementaux (pression, température, humidité relative, vitesse et direction du vent et 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 depuis son installation. En 2023, une quatrième station a été testée (installation prévue en 2024) avec l'objectif d'optimiser l'acquisition des données à partir du coté oriental du volcan. En effet, la géométrie actuelle du réseau ne permet pas une caractérisation des panaches qui associés à une activité située dans les Grandes Pentes, ou à des phases les plus intenses, quand le panache de grande altitude se disperse vers l'est. Grâce à 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) aucune panne majeure n'a eu lieu en 2023.

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. La distribution des données est aujourd'hui assurée directement par le réseau NOVAC.
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).
L'intégration du Piton de la Fournaise dans l'estimation des bilans mondiaux d'émissions volcaniques 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.

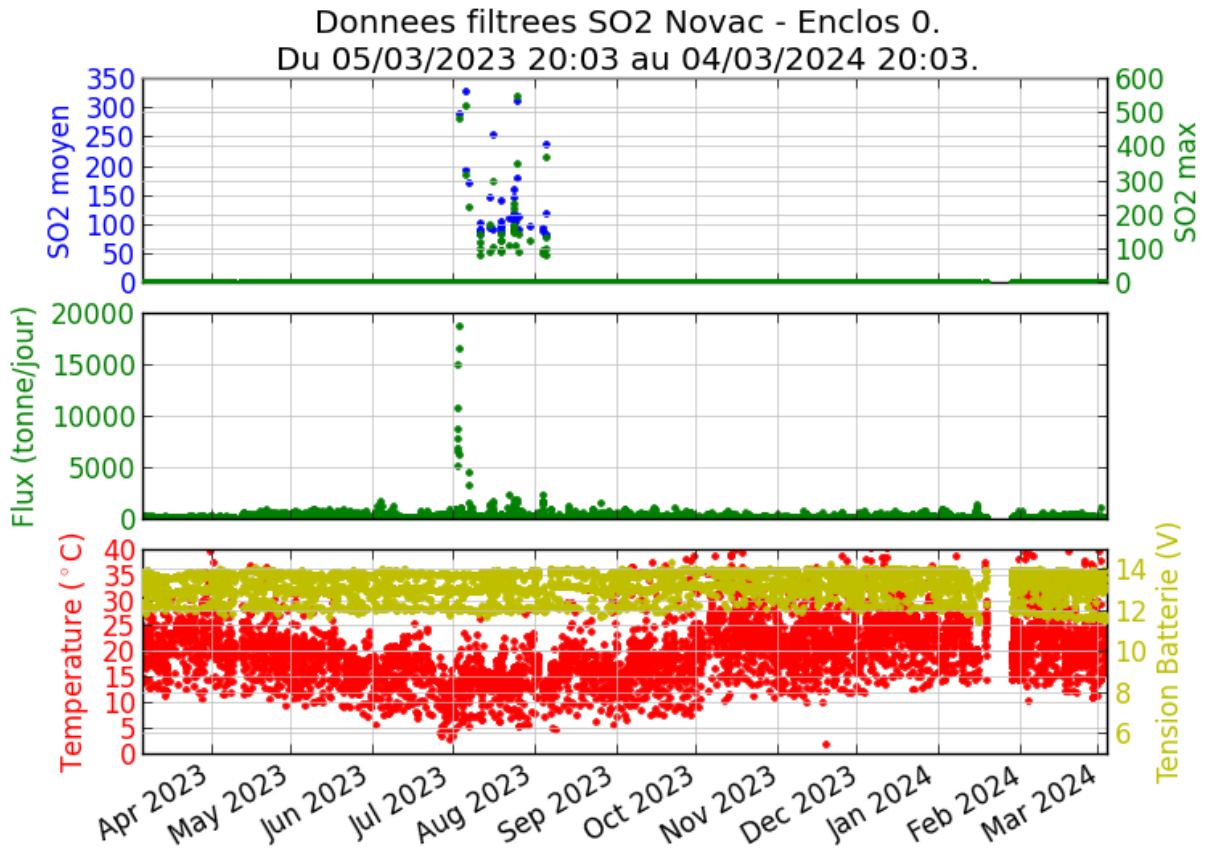

Figure 36 : Routine de surveillance des émissions de SO_2 (Intranet OVPF) – exemple sur l'année 2023 avec la station Enclos 0 (secteur ouest du volcan) ; en haut) Épaisseur optique (ppm.m) de SO_2 dans l'atmosphère sommitale du Piton de la Fournaise, mesurée par scanning DOAS. Données filtrées représentatives 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 de juillet 2023, ainsi que sa décroissance rapide. En bas) Conditions opérationnelles du spectromètre (température dans le boitier, et tension des batteries).

En 2023, le réseau NOVAC a parfaitement détecté sur les 3 stations l'augmentation des émissions de SO_2 associée à l'activité éruptive de l'éruption du 2 juillet – 10 août 2023 (Figure 36). Notamment, le réseau a permis de mettre en évidence une décroissance rapide du flux éruptif pendant l'éruption.

> 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 et 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.

La station a été en panne en 2023. Une nouvelle station vient d'être livrée et remplacera l'ancienne qui pourra être envoyée au laboratoire INGV pour réparation et calibration.

> 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 de La Réunion a été mise en place en collaboration avec l'équipe du Parc National de La Réunion. 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, dans le cadre de la thèse de G. Boudoire (2017) et du post-doctorat de B. Bénard (Bénard et al., 2023) 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.

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 37). Depuis l'éruption d'avril 2021, cette tendance

s'est inversée (diminution des émissions de CO_2), pour ensuite se stabiliser en 2023. Cette évolution pourrait suggérer la vidange des réservoirs profonds par le transfert des magmas déjà dégazés vers des niveaux crustaux moins profonds.

En 2023, une augmentation modérée du flux de CO_2 a précédé l'éruption de juillet, traduisant possiblement une réalimentation profonde (Figure 37).

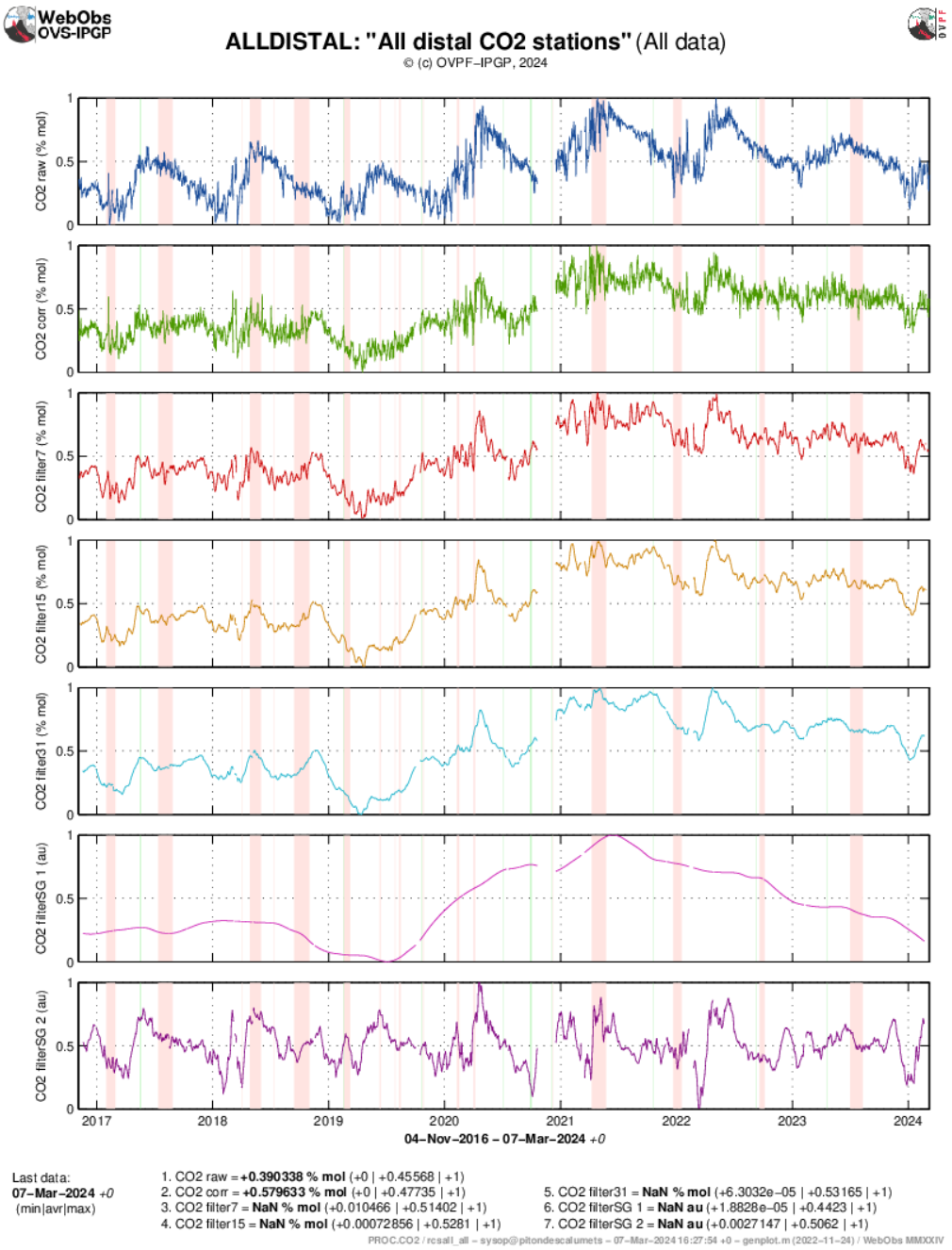

Figure 37 : Évolution temporelle moyenne des concentrations molaires en CO_2 dans le sol (valeurs brutes horaires et données filtrées) sur les sites BLEN, PCRN et PNRN situés sur le flanc ouest du volcan (secteur distal) entre 2017 et 2023. On remarquera la forte augmentation enregistrée par l'ensemble du réseau entre 2019 et 2021. Barres rouges : éruptions. Barres vertes : intrusions.

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 38). Depuis juin 2023, cette activité de suivi n'a plus eu lieu.

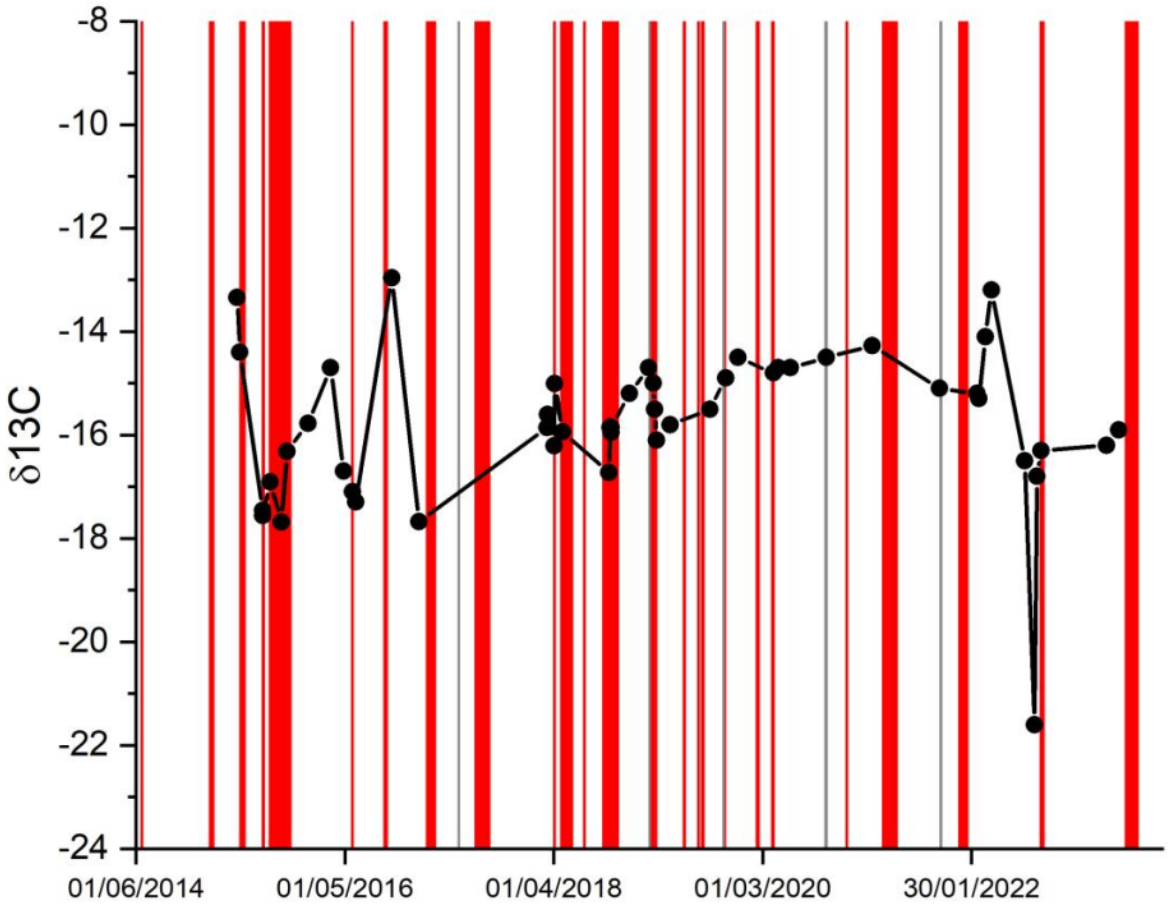

Figure 38 : Évolution temporelle de la signature isotopique du carbone du CO_2 dans le sol (0,5 m de profondeur) mesurée sur le point d'anomalie principal (P0) situé le long du profil de contrôle du Gîte, à 4 km du cône central. Les phases présentant des valeurs moins négatives indiquent une augmentation 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 et 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 39).

Figure 39 : 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 40).
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, suggère une tendance générale à l'augmentation du rapport R/Ra, entrecoupée de variations rapides (Figure 40). 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.

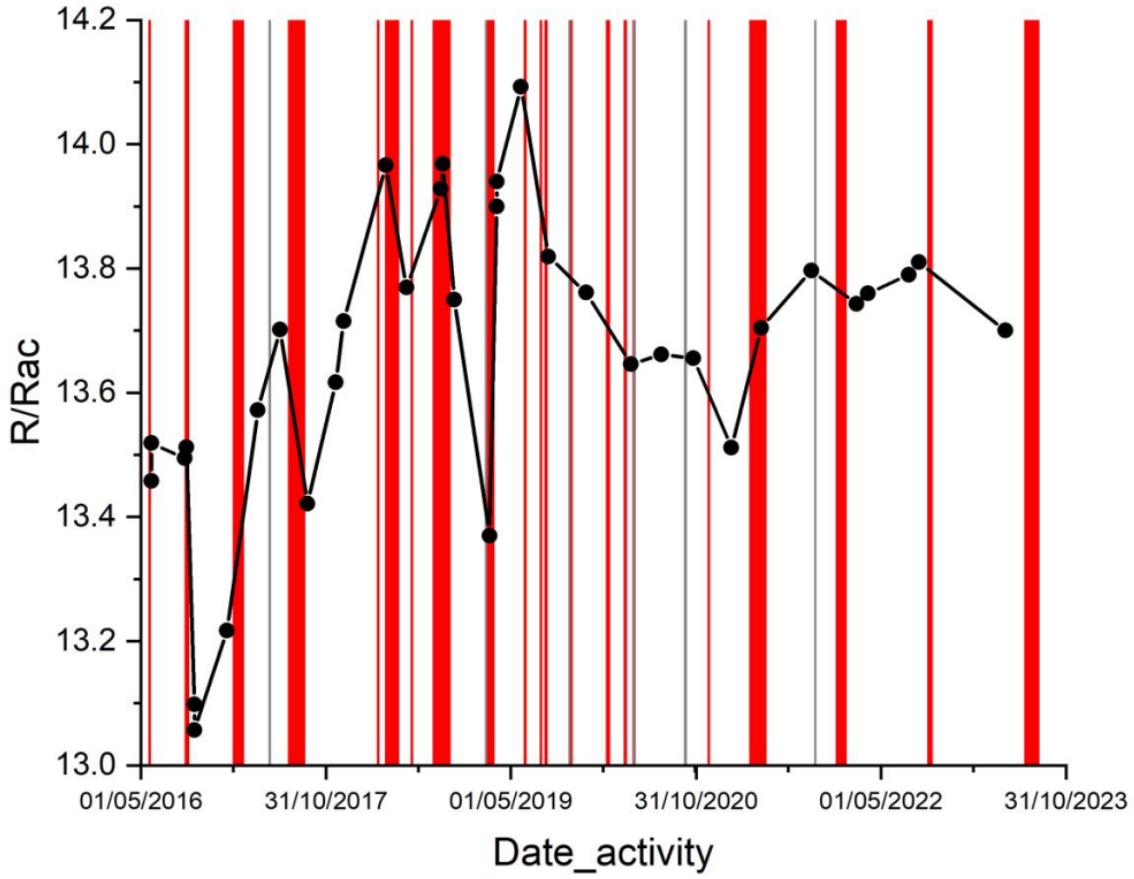

Figure 40 : Évolution temporelle de la signature isotopique de l'hélium ($^3He/^4He$, normalisé à l'air, R/Ra) dans la fraction gazeuse des sources thermales de Cilaos (source Irenée) au sein des anciens thermes de Cilaos. En rouge : les éruptions, en gris : les intrusions.

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.

Ce suivi a été mis en pause depuis mai 2023.

> Composition des produits solides de l'éruption du 2 juillet – 10 août 2023

Les échantillons collectés par l'équipe de l'OVPF sont envoyés pour analyses aux laboratoires IPGP (Paris), OPGC-LMV (Clermont-Ferrand) et au LGL-TPE (Univ. Lyon) 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 articles de recherche répertoriés dans la section de référence à la fin de cette section et peut changer en fonction de l'évolution de la modélisation géochimique et pétrologique.

Code	Occured	Collected	Collected time	Material	Texture/Size	Note on sample	Note on location	Latitude	Longitude	Elevation (m)
			UTM							
REU230703-01	02 - 03/07/2023	03/07/2023	06:00	lava	Dense, fragmented	Collected hot but already quenched in air, cooled in water	A'a' levée Fisure 3	-21° 16' 25.18''	55° 44' 26.981 ''	1699
REU230703-02	02 /07/2023	03/07/2023	10:00	lava	Dense/ glassy crust	Air quenched, collected on the cooled lava flow. smell bad like organic or plastic burned	lava from fissure 1	-21° 14' 20.40 ''	55° 44' 7.08''	1867
REU230725-01	02 -03 /07/2023 doubts	25/07/2023	11 :00	scories	Black sories, dense	Collected at the highest end of the fissure	Fissure 1	-21°14' 27.315"	55° 43' 41.986"	2118
REU230725-02	??? doubts	25/07/2023	11 :00	scories	Bombs, likely not this eruption with lichen	Collected at the highest end of the fissure	Fissure 1	-21°14' 27.315"	55° 43' 41.986"	2118
REU2307028-01	Likely on the 27 or 28 ?	28/07/2023	10 :00	Bomb and scories	Black light scoria and dense bomb	Collected at the active vent	Cone (fissure 3)	-21°16' 19.8"	55°44' 15.2"	1730
REU230906-01	02 -03 /07/2023	06/09/2023	11 :00	Scories	Black light scoria	Collected at the fissure	Fissure 2b	-21° 14' 15.41"	55° 44' 21.62"	1764
REU230906-02	02 -03 /07/2023	06/09/2023	11 :20	Scories	Black light scoria	Collected at the fissure	Fissure 2a	-21° 14' 16.31	55° 44' 17.87"	1792
REU230906-03	02 -03 /07/2023	06/09/2023	11 :45	Lava	Glassy pahoehoe levée	Collected at the border of the lava flow (30 cm thick)	Lava flow From fissure1	-21° 14' 20.947"	55° 43' 54.74"	1999
REU230906-04	02 -03 /07/2023	06/09/2023	12 :00	Scories	Black light scoria	Collected at the fissure)	Fissure 1	-21° 14' 20.137"	55° 43' 52.16"	2020

Tableau 6 : Liste des échantillons collectés lors de l'éruption du 2 juillet – 10 août 2023 et métadonnées correspondantes.

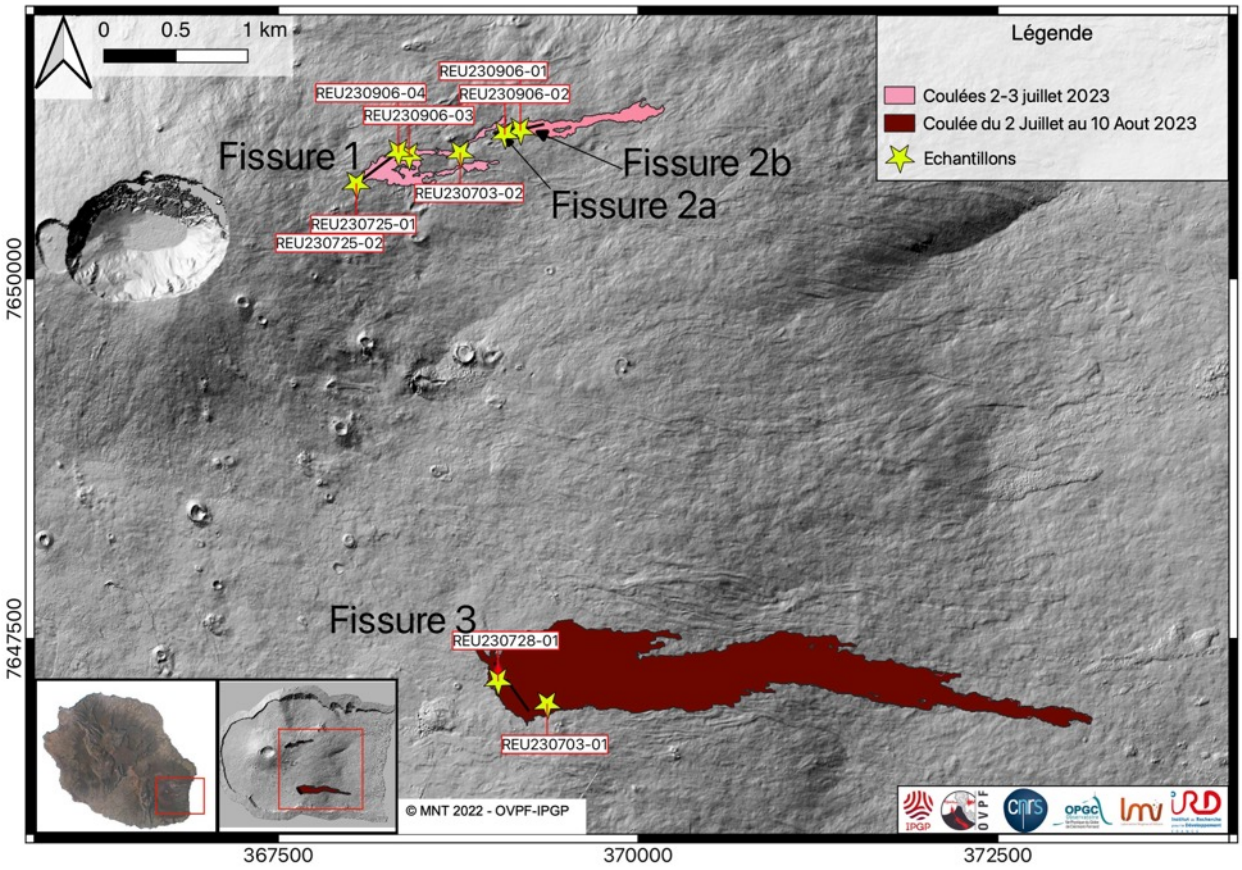

Figure 41 : Localisation des échantillons collectés lors de l'éruption du 2 juillet – 10 août 2023 (Tableau 6).

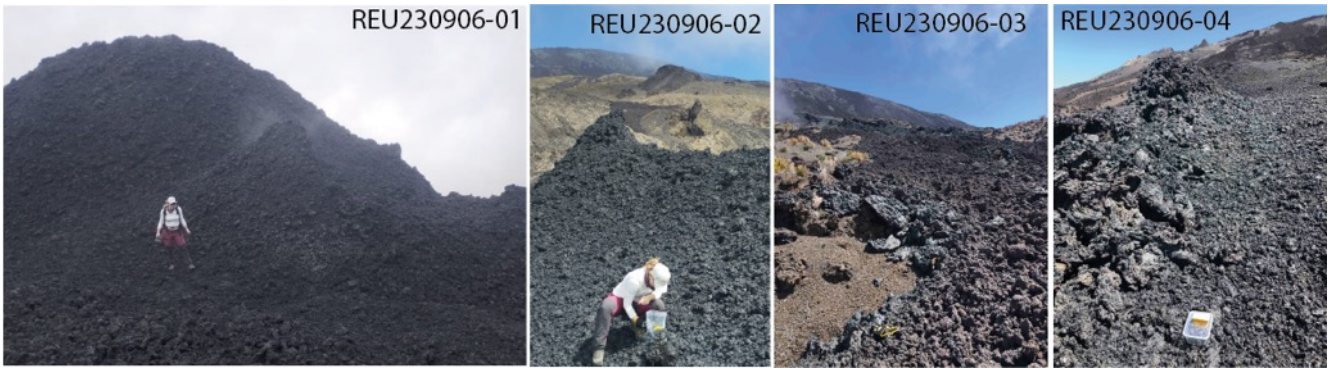

Figure 42 : Photographies des sites d'échantillonnage.

> Données physiques

Figure 43 : Fragments d'échantillons collectés par l'OVPF lors de l'éruption du 2 juillet – 10 août 2023 (Tableau 6)

Neuf échantillons ont été prélevés pendant l'éruption, dont un s'est avéré antérieur à l'éruption (présence de végétation sur l'échantillon). Les 8 échantillons, dont 3 fragments de lave (deux de la fissure1 et un de la fissure 3) et 5 sacs de scories (prélevés sur les différentes fissures) ont été analysés en termes de porosité, de connectivité, de teneur en microphénocristaux, de pétrographie et de chimie.

Les deux types de lave collectés au début de l'éruption sont caractérisés par des valeurs de porosité contrastées ; REU230703-01 collecté au niveau de la fissure sud (fissure 3 sur la Figure 41) étant une lave dense avec une porosité moyenne de 37 % (Figure 44, Tableau 7). En revanche, la croûte vitreuse REU230703-02, collectée au niveau de la fissure nord (fissure 1 sur la Figure 41), a une porosité moyenne de 68 %. Le dernier échantillon de lave collecté (REU230906-3) de la fissure 1 (Figure 41) est encore caractérisé par des valeurs de porosité relativement élevées (valeur moyenne de 69 %).

Sample	Type	a	b	c	Wt (gr)	Envelope Volume	Density	SD	Porosity	Skeleton Volume	SD	Connectivity
		(mm)	(mm)	(mm)	(gr)	(cm^3)	gr/cm^3	gr/cm^3	(%)	(cm^3)	gr/cm^3	(%)
Reu230703_1_1a	Lava	41,468	22,0357	1,8819	41,468	22,036	1,882	0,012	34,656	13,7826	0,025	108
Reu230703_1_1b	Lava	44,16	24,4506	1,8061	44,160	24,451	1,806	0,075	37,288	14,6676	0,024	107
Reu230703_1_2a	Lava	24,881	13,3694	1,8610	24,881	13,369	1,861	0,009	35,382	8,335	0,014	106
Reu230703_1_2b	Lava	27,832	15,9403	1,7460	27,832	15,940	1,746	0,002	39,375	9,342	0,018	105
Reu230703_1_2c	Lava	23,05	13,7217	1,6798	23,050	13,722	1,680	0,008	41,674	7,7598	0,015	104
Reu230703_1_2d	Lava	21,758	11,9040	1,8278	21,758	11,904	1,828	0,004	36,535	7,317	0,017	105
Reu230703_2a	Lava	16,949	19,2295	0,8814	16,949	19,230	0,881	0,003	69,396	5,9724	0,011	99
Reu230703_2b	Lava	21,098	24,4183	0,8640	21,098	24,418	0,864	0,003	70,000	7,3506	0,012	100
Reu230703_2c	Lava	11,264	11,3222	0,9948	11,264	11,322	0,995	0,003	65,458	4,1426	0,005	97
REU230906-3-1	Lava	35,00	32,00	25,00	10,735	11,906	0,902	0,004	68,694	3,766	0,008	100
REU230906-3-2	Lava	32,00	27,00	23,00	9,2799	9,759	0,951	0,003	66,983	3,256	0,011	99
REU230906-3-3	Lava	38,00	31,00	25,00	8,4739	10,210	0,830	0,002	71,184	3,024	0,009	99

Tableau 7 : Données de densité, porosité et connectivité des laves émises lors de l'éruption du 2 juillet – 10 août 2023 (a, b, c = axe maximum, intermédiaire, minimum ; Wt = masse ; SD = écart type).

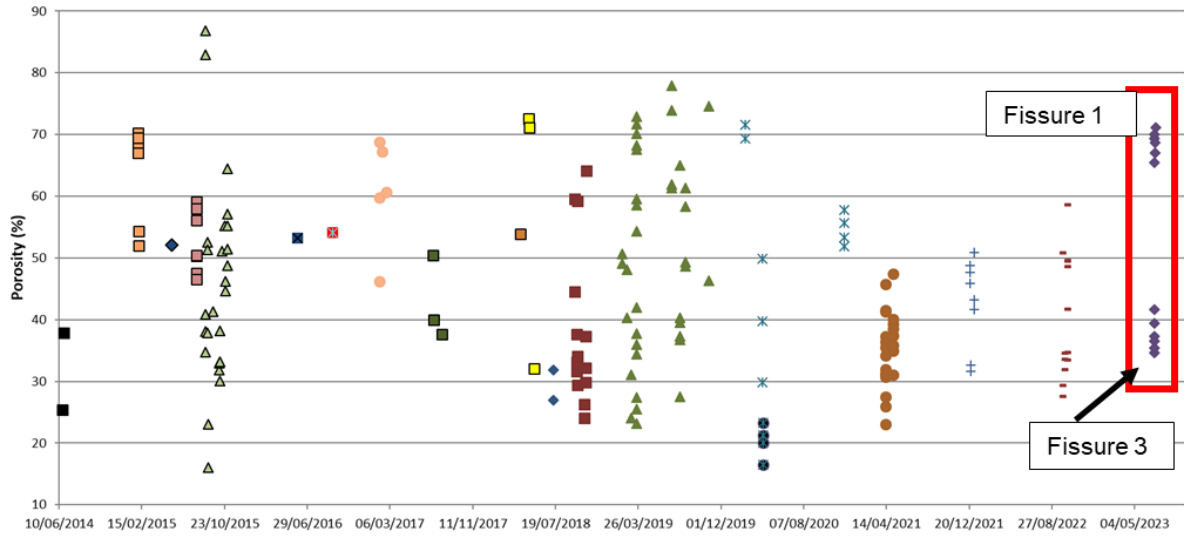

Figure 44 : Série temporelle de porosité pour les échantillons de lave. Les teneurs en vésicules les plus faibles correspondent aux fragments trempés. Les échantillons de l'éruption de juillet-août 2023 mesurés par l'OPGC-LMV sont caractérisés par deux valeurs contrastées (voir rectangle rouge).

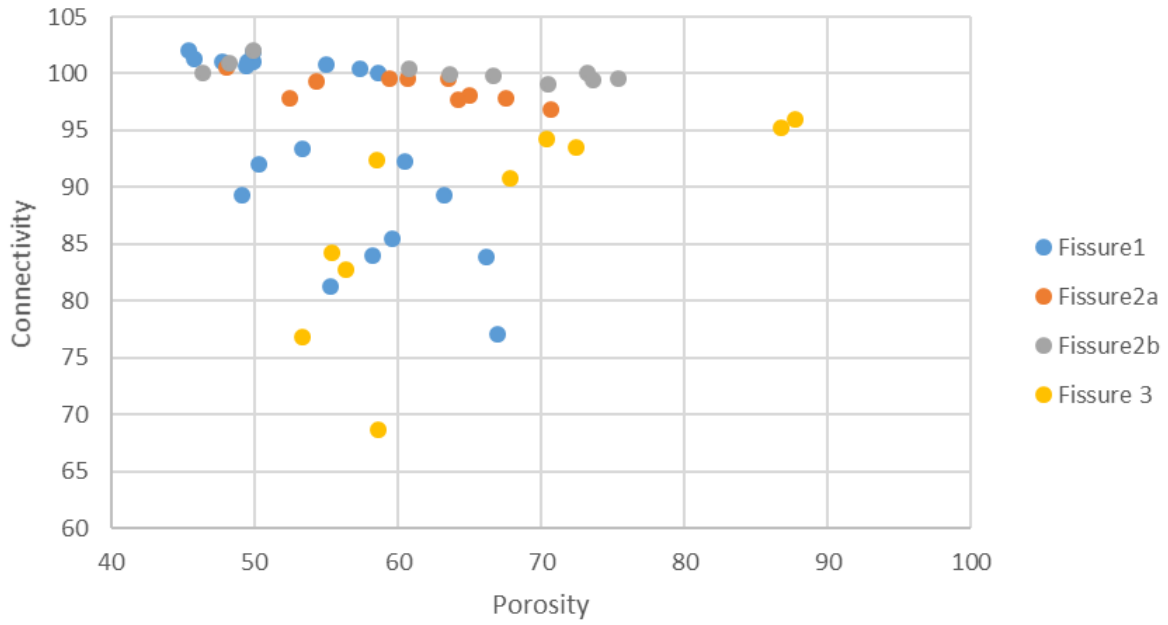

Figure 45 : Porosité versus connectivité des échantillons de pyroclastes collectés au niveau des différentes fissures (voir Figures 41 et 42) de l'éruption de juillet-août 2023.

Les pyroclastes collectés au niveau des différentes fissures présentent aussi des valeurs de porosité et de connectivité contrastées. Les valeurs de porosité les plus élevées (plus de 80 %), corrélées à la présence de ponce dorée, proviennent de la fissure 3, où la lave émise est la plus dense (Figures 44 et 45). La fissure 1, caractérisée par de la lave relativement poreuse, présente par contre les valeurs de porosité les plus faibles dans les fragments constitués de scories épineuses opaques et de scories fluidales/épineuses (Tableau 8). Les fissures 1 et 3 sont caractérisées aussi par des scories épineuses/dorées avec des vésicules isolées (valeurs de connectivité plus faibles). Les fissures 2a et 2b sont caractérisées par des scories épineuses avec 100 % de connectivité. La préservation des vésicules isolées s'explique par une activité de fontaine (fissure 1 et 3) lors de l'émission de ces échantillons, tandis que les fragments complètement connectés sont révélateurs d'explosions stromboliennes au niveau de la fissure 2 (Gurioli et al., 2018 ; Thivet et al., 2020b ; Colombier et al., 2017).

Sample	Type	a	b	c	Wt (gr)	Envelope Volume	Density	SD	Porosity	Skeleton Volume	SD	Connectivity
		(mm)	(mm)	(mm)	(gr)	(cm^3)	gr/cm^3	gr/cm^3	(%)	(cm^3)	gr/cm^3	(%)
REU230906-01-1	Spiny	36,00	33,00	23,00	12,6163	8,176	1,543	0,010	46,420	4,378	0,009	100
REU230906-01-2	Spiny	48,00	41,00	27,00	21,3694	14,815	1,442	0,010	49,917	7,266	0,012	102
REU230906-01-3	Spiny	41,00	31,00	19,00	10,5674	7,087	1,491	0,005	48,229	3,638	0,020	101
REU230906-01-4	Spiny	32,00	23,00	22,00	4,0795	5,752	0,709	0,005	75,372	1,434	0,002	100
REU230906-01-5	Spiny	37,00	25,00	20,00	6,3591	8,243	0,771	0,002	73,215	2,205	0,002	100
REU230906-01-6	Spiny	40,00	31,00	21,00	7,2483	8,524	0,850	0,002	70,476	2,573	0,007	99
REU230906-01-7	Spiny	25,00	23,00	17,00	3,4917	3,332	1,048	0,004	63,618	1,214	0,001	100
REU230906-01-8	Spiny	25,00	17,00	14,00	3,5778	3,167	1,130	0,004	60,774	1,234	0,001	100
REU230906-01-9	Spiny	27,00	24,00	20,00	3,9627	4,128	0,960	0,002	66,670	1,380	0,002	100
REU230906-01-10	Spiny	27,00	22,00	17,00	2,7101	3,571	0,759	0,003	73,649	0,955	0,002	99
REU230728-01-1	spiny/golden	33,00	29,00	12,00	4,5950	5,381	0,854	0,001	70,351	1,811	0,009	94
REU230728-01-2	spiny/golden	34,00	29,00	20,00	8,1869	6,851	1,195	0,001	58,507	3,147	0,017	92
REU230728-01-3	spiny/golden	35,00	29,00	18,00	7,3567	9,254	0,795	0,002	72,399	2,993	0,008	93
REU230728-01-4	spiny/golden	29,00	26,00	14,00	5,9708	4,653	1,283	0,003	55,444	2,480	0,004	84
REU230728-01-5	spiny/golden	29,00	17,00	15,00	4,1925	3,121	1,343	0,001	53,365	1,841	0,002	77
REU230728-01-6	spiny/golden	33,00	16,00	10,00	1,9228	1,613	1,192	0,003	58,608	0,963	0,003	69
REU230728-01-7	spiny/golden	30,00	21,00	20,00	3,3770	3,641	0,927	0,001	67,802	1,401	0,002	91
REU230728-01-8	spiny/golden	24,00	19,00	18,00	3,7888	3,017	1,256	0,001	56,392	1,609	0,003	83
REU230728-01-9	golden	22,00	17,00	12,00	0,7858	2,231	0,352	0,002	87,767	0,352	0,006	96
REU230728-01-10	golden	20,00	17,00	12,00	0,7117	1,871	0,380	0,002	86,795	0,325	0,005	95
REU230906-04-1	Spiny/fluidal	48,00	28,00	20,00	6,8820	5,348	1,287	0,008	55,319	2,942	0,013	81
REU230906-04-2	Spiny/fluidal	34,00	23,00	23,00	7,0621	6,065	1,164	0,002	59,569	2,978	0,009	85
REU230906-04-3	Spiny/fluidal	46,00	22,00	19,00	4,9333	5,184	0,952	0,004	66,962	2,509	0,008	77
REU230906-04-4	Spiny/fluidal	36,00	23,00	20,00	6,5429	4,465	1,465	0,001	49,125	2,505	0,005	89
REU230906-04-5	Spiny/fluidal	30,00	21,00	16,00	4,1097	3,061	1,343	0,003	53,382	1,535	0,004	93
REU230906-04-6	Spiny/fluidal	26,00	18,00	18,00	3,0543	2,883	1,059	0,001	63,215	1,255	0,003	89
REU230906-04-7	Spiny/fluidal	24,00	15,00	13,00	1,9682	1,638	1,202	0,003	58,281	0,836	0,003	84
REU230906-04-8	Spiny/fluidal	23,00	19,00	12,00	1,9058	1,674	1,139	0,005	60,469	0,740	0,004	92
REU230906-04-9	Spiny/fluidal	23,00	21,00	14,00	3,9577	2,764	1,432	0,002	50,292	1,484	0,004	92
REU230906-04-10	Spiny/fluidal	26,00	17,00	15,00	2,3356	2,395	0,975	0,003	66,135	1,066	0,007	84
REU230906-2-1	Spiny	49,00	25,00	20,00	5,5075	6,523	0,844	0,002	70,688	2,059	0,009	97
REU230906-2-2	Spiny	51,00	34,00	26,00	9,8308	7,172	1,371	0,002	52,410	3,493	0,008	98
REU230906-2-3	Spiny	46,00	29,00	21,00	6,8521	6,639	1,032	0,003	64,167	2,474	0,007	98
REU230906-2-4	Spiny	36,00	27,00	19,00	6,5699	6,258	1,050	0,001	63,549	2,299	0,003	100
REU230906-2-5	Spiny	47,00	26,00	18,00	5,4434	5,829	0,934	0,001	67,580	1,975	0,003	98
REU230906-2-6	Spiny	30,00	25,00	20,00	6,4743	4,330	1,495	0,002	48,090	2,238	0,004	100
REU230906-2-7	Spiny	36,00	21,00	21,00	5,3379	4,716	1,132	0,003	60,698	1,865	0,003	100
REU230906-2-8	Spiny	25,00	24,00	15,00	3,7427	2,842	1,317	0,006	54,278	1,310	0,003	99
REU230906-2-9	Spiny	35,00	25,00	17,00	4,42608	4,230	1,007	0,006	65,024	1,532	0,002	98
REU230906-2-10	Spiny	38,00	28,00	20,00	6,0676	5,188	1,170	0,003	59,389	2,122	0,002	100
REU230725-1-1	Spiny/opaque	30,00	22,00	18,00	6,3492	4,398	1,444	0,003	49,875	2,161	0,006	102
REU230725-1-2	Spiny/opaque	32,00	24,00	18,00	5,4245	3,761	1,442	0,004	49,924	1,864	0,003	101
REU230725-1-3	Spiny/opaque	27,00	23,00	20,00	4,547	3,123	1,456	0,007	49,441	1,569	0,001	101
REU230725-1-4	Spiny/opaque	26,00	22,00	19,00	5,1238	3,525	1,454	0,008	49,524	1,762	0,001	101
REU230725-1-5	Spiny/opaque	33,00	20,00	17,00	5,426	3,475	1,561	0,004	45,785	1,863	0,002	101
REU230725-1-6	Spiny/opaque	28,00	21,00	15,00	4,6209	3,070	1,505	0,004	47,736	1,590	0,002	101
REU230725-1-7	Spiny/opaque	32,00	24,00	18,00	4,8159	3,713	1,297	0,004	54,962	1,655	0,001	101
REU230725-1-8	Spiny/opaque	25,00	16,00	14,00	2,6885	2,190	1,228	0,002	57,368	0,928	0,001	100
REU230725-1-9	Spiny/opaque	26,00	17,00	15,00	3,2761	2,751	1,191	0,002	58,653	1,136	0,001	100
REU230725-1-10	Spiny/opaque	21,00	19,00	15,00	4,0658	2,584	1,574	0,002	45,365	1,388	0,001	102

Tableau 8 : Données de densité, porosité et connectivité des pyroclastes émis en juillet-août 2023 (a, b, c = axe maximum, intermédiaire, minimum ; Wt = poids ; SD = écart type).

> Données pétrologiques

La teneur totale en cristaux (essentiellement des microphénocristaux) varie de 15 % à 40 % (Tableau 9, Figure 46). Cette grande variabilité s'observe à la fois dans les fragments au sein d'une même fissure (de 15% jusqu'à 30% dans la fissure 1) et entre les différentes fissures. Les valeurs de cristallinité les plus élevées se trouvent dans les scories épineuses collectées dans les fissures 2a et 2b. La cristallinité élevée est corrélée à une augmentation du pourcentage de plagioclase qui varie de 8% à 24%, tandis que le pyroxène et l'olivine varient de 6% à 16%. La valeur la plus faible de la teneur en plagioclase se trouve dans la seule pierre ponce dorée examinée.

Fissure	1	1	1	2a	2b	3
Sample	Reu230703-2	Reu230906-3	Reu230906-4	Reu230906-2	Reu230906-1	Reu230728-1
Type	Lava	Lava	Fluidal	Spiny	Spiny	Golden
Vesicles (2D)	46,3	45,8	61,9	2,3	55,5	71
SD		9,8	3,1	2,3	2,2	1,9
Plagio	8,2	14,2	18,8	23,8	21,5	7,8
SD		2,3	1,6	3,5	2,2	0,7
Pyrox+olivine	6,3	9,1	11,6	16,3	11,6	10,2
SD		1,1	1,2	2,2	3,2	0,0
Total crystals	14,5	23,3	30,4	40,1	33,1	18,0

Tableau 9 : Variation de la teneur en cristaux (en pourcentage) dans les différents fragments collectés dans les quatre fissures de l'éruption de juillet-août 2023. Le pourcentage de vésicules est celui mesuré à partir des images 2D et ne représente pas la porosité réelle car les images sont prises sur la partie la plus dense de l'échantillon. SD correspond aux écarts types de deux images prises à partir du même claste.

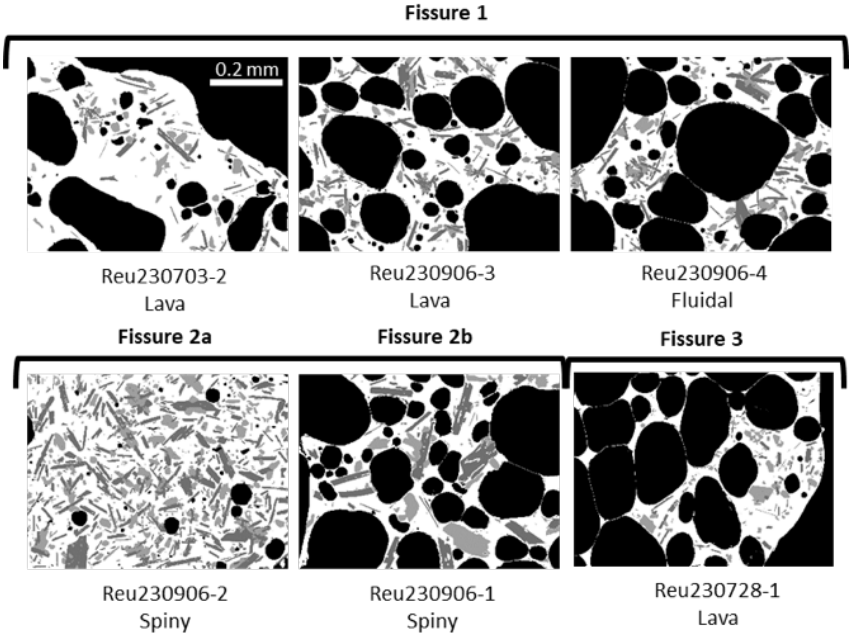

Figure 46 : Images en quatre couleurs analysées sur Photoshop à partir d'images en électrons rétrodiffusés. Noir = vésicules, blanc = verre, gris clair = pyroxène+olivines, gris foncé = plagioclase.

> Données géochimiques

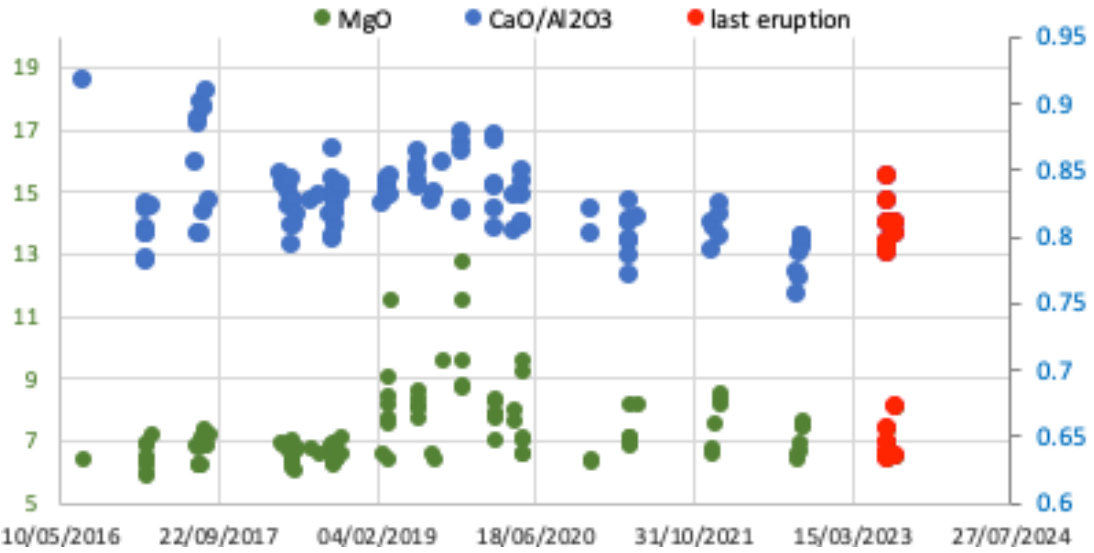

Figure 47 : Évolution temporelle de la composition roche totale des laves et téphras émis par le Piton de la Fournaise depuis 2014. Les phases à forte teneur en - MgO (MgO > 8 % en poids) sont liées à l'augmentation de la quantité de phénocristaux d'olivine.

Les analyses de la composition en éléments majeurs de roches totales ont été effectuées par XRF à l'IPGP. Les échantillons ne montrent pas de variations significatives par rapport aux éruptions qui se sont produites depuis mi-2020 et dont les produits éruptifs sont caractérisés par un faible teneur en phénocristaux (Figure 47). Une légère augmentation du rapport Ca/Al pourrait être en partie un effet de l'accumulation de clinopyroxène (voir partie pétrologie), mais cette hypothèse devra être confirmée par les analyses des éléments en traces.

Les isotopes du Pb, du Sr et du Nd ont été analysés au LMV sur deux échantillons : REU230906-03 (fissure 1) et REU230703-01 (fissure 3 ; Tableau 10). Les résultats indiquent des valeurs plutôt stables par rapport aux éruptions précédentes, dans la gamme des valeurs basses (Figure 48). Une inversion de la tendance décroissante observée depuis 2020 est cependant possible, à confirmer lors de la prochaine éruption.

	206Pb/204Pb NBS 981	207Pb/204Pb NBS 981	208Pb/204Pb NBS 981	208Pb/206Pb	87Sr/86Sr NBS 987		143/Nd/144Nd	
REU230906-03	18.8549	15.5719	38.8892	2.0626	0.704085	± 7E-06	0.512846	± 5.9E-06
REU230703-01	18.8417	15.5776	38.8881	2.0639	0.704082	± 8E-06	0.512853	± 7.9E-06

Tableau 10 : Analyses du Pb, Sr et du Nd.

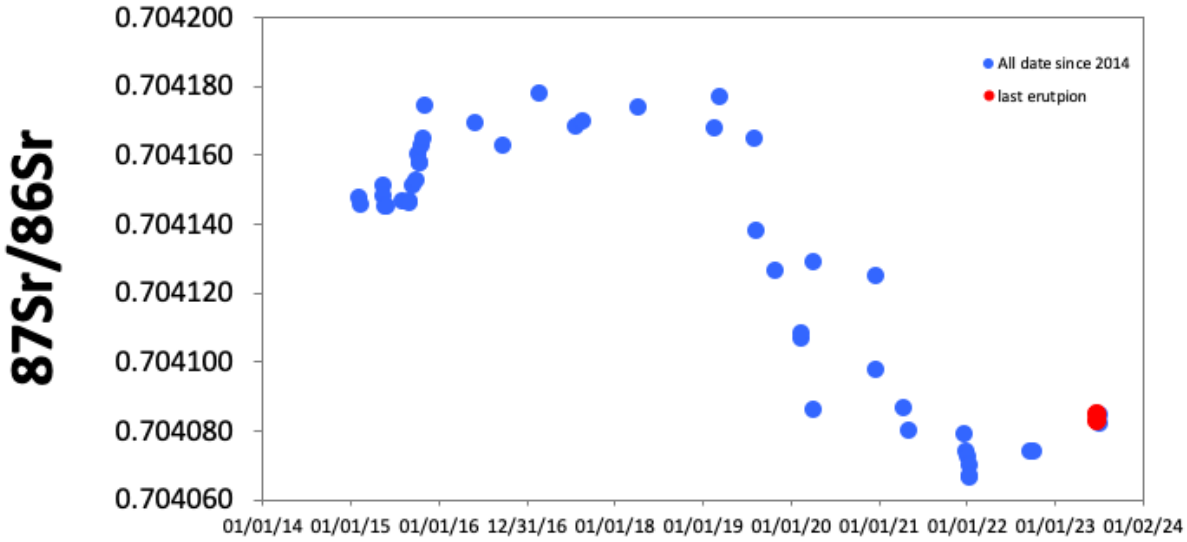

Figure 48 : Évolution temporelle du rapport $^{87}Sr/^{86}Sr$ des laves et téphras émis par le Piton de la Fournaise depuis 2014.

> Analyse pétrologique

L'analyse XRF de la roche totale suggère que la fissure 3 a émis les magmas les plus mafiques produits par l'éruption (REU230728-1, MgO 8.2% et REU230703-1, MgO 7.5%). Le deuxième échantillon a un rapport CaO/Al_2O_3 bien plus élevé que les valeurs habituelles (0.85 à la place de 0.81).

Les analyses effectuées au LMV (EPMA) et au LGL-TPE (MEB) montrent que l'échantillon le plus magnésien (REU230728-1) est une bombe peu cristallisée, qui contient surtout des microlites de plagioclase sodique d'environ 100-150 µm (An65-52) et peu de petits microlites de pyroxène augitique magnésien (En58) et d'olivine magnésienne. Les phases magnésiennes peuvent tracer une faible cristallisation en profondeur, tandis que le reste de la cristallisation (plagioclases sodiques) a vraisemblablement eu lieu lors de la remontée et de l'éruption. Le verre est relativement magnésien aussi (MgO 6.0%), ce qui est cohérent avec une cristallisation modérée. La température pré-éruptive du magma est assez élevée (1150 °C, thermométrie sur verre, 1210 °C, thermométrie sur roche totale - en utilisant le thermomètre de Rhéty et al. (2017)), mais reste similaire à celle des éruptions précédentes (Figure 49).

Ces caractéristiques diffèrent grandement de celles de la lave REU230703-1 qui est très cristallisée et qui a été émise en premier par la fissure n°3. Par rapport à la bombe, cet échantillon contient des quantités importantes de microphénocristaux. La paragenèse est composée de i) rares microphénocristaux d'olivine magnésienne (Fo84) et spinelle. Les microlites d'olivine sont très abondants, moins magnésiens (Fo 79-73) et contiennent de nombreuses inclusions vitreuses, ii) des microphénocristaux (En 46) et des microlites (En 44-42) de clinopyroxène augitique assez ferrifères sont très abondants et associés à iii) des microphénocristaux et microlites (An70) de plagioclase. Une faible accumulation de clinopyroxène pourrait expliquer le rapport CaO/Al_2O_3 inhabituellement élevé de la roche totale. La composition des phases (plagioclase calcique et olivine magnésienne) suggère une importante cristallisation en profondeur, probablement au niveau du réservoir magmatique localisé au « niveau de la mer » ou plus superficiel, suivie par la formation de microlites dendritiques et squelettiques lors de la remontée et de l'éruption. Le plagioclase (An 70) est en équilibre avec un liquide évolué avec une faible teneur en eau.

La composition des inclusions vitreuses dans les microlites suggère une température pré-éruptive d'environ 1100 °C suivie par un faible refroidissement avant trempe. Cependant, cet échantillon étant mal trempé, les interprétations basées sur la composition des verres doivent être considérées avec précaution.

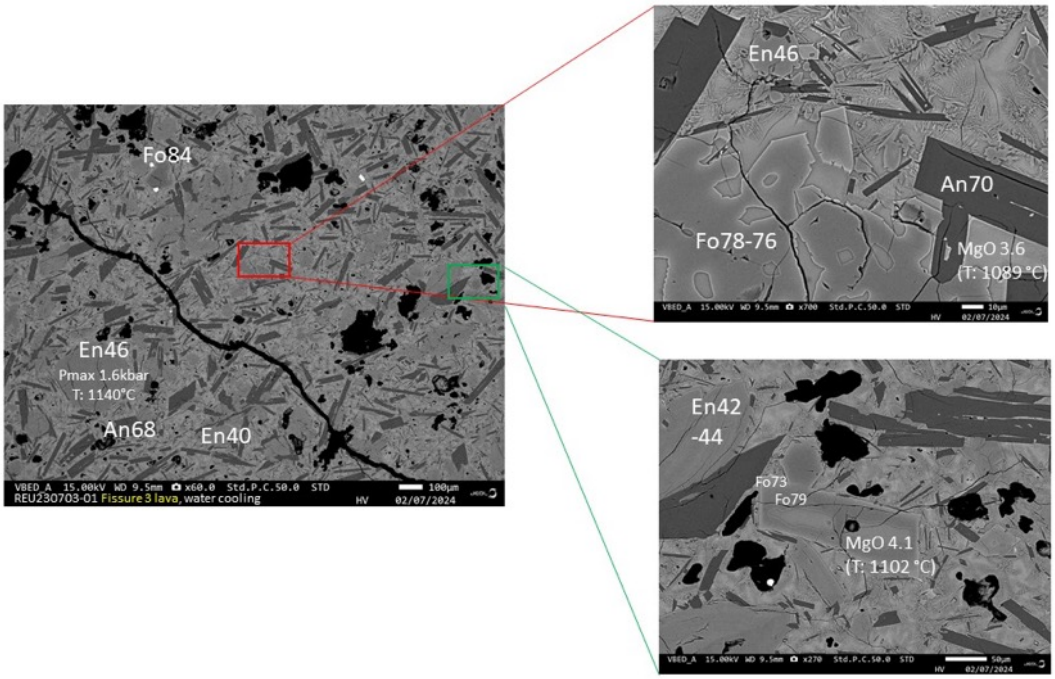

Figure 49 : Analyse pétrologique de la lave, très cristallisée, émise par la fissure n° 3 (REU230703-1).

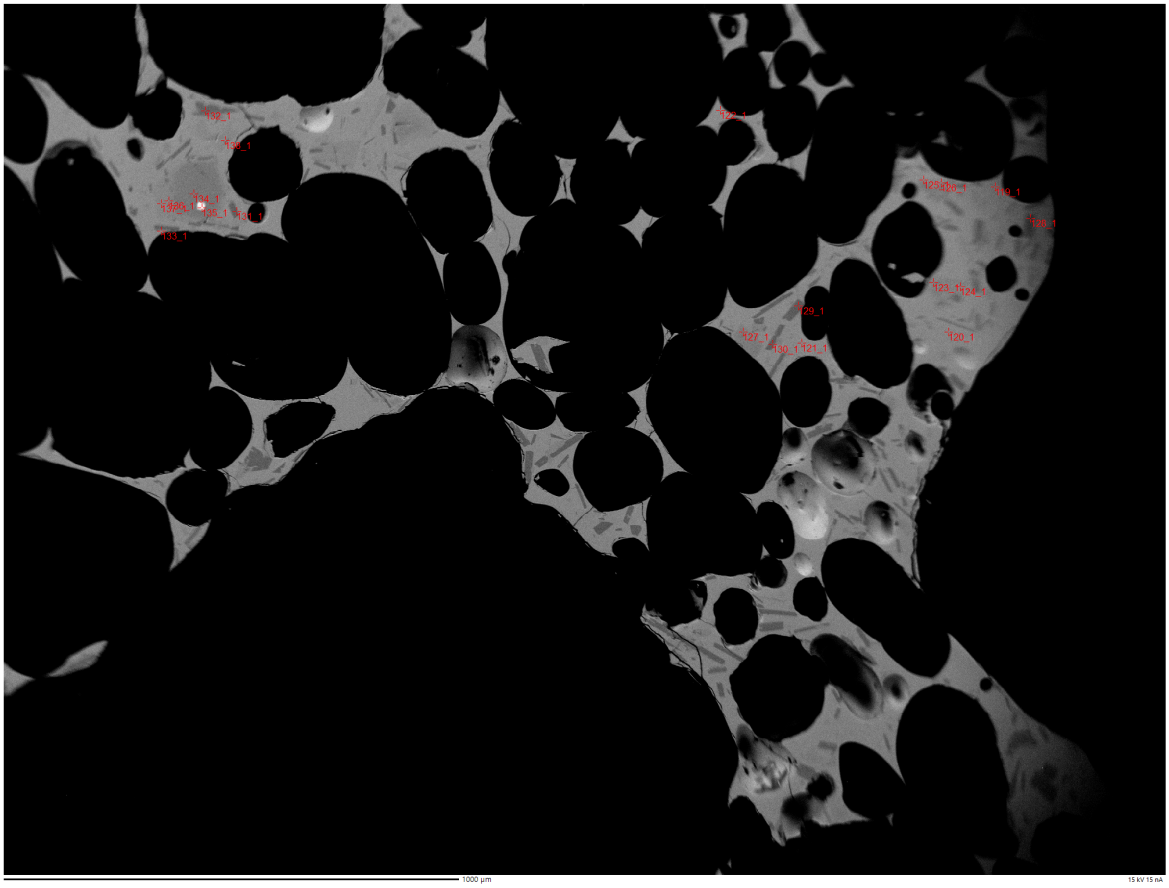

Figure 50 : Images en électrons rétrodiffusés de la ponce dorée émise par la fissure n° 3 (REU230728-1).

L'analyse de la roche totale montre que la fissure 1 a émis un magma homogène et le plus évolué (MgO 6.6 %) de l'éruption, tandis que les fissures 2a et 2b situées plus en aval ont émis un magma légèrement plus magnésien (7.1-6.7).

La lave a'a de la fissure 1 (REU230703-2) est moins cristallisée que celle de la fissure 3. Par contre, à part l'absence d'olivine magnésienne et la rareté de l'olivine, les compositions des plagioclases (An 67) et des pyroxènes (augite ferrifère) sont très proches de celle de la lave de la fissure 3.
La lave pahoehoe (REU230906-03) a la même paragenèse (olivine, pyroxene+plagioclase), mais avec des compositions très différentes. Les pyroxènes contenus dans cette lave sont les plus magnésiens (En64-62) mesurés dans les produits de l'éruption et les plagioclases les plus sodiques (An 46-41).
La composition du verre interstitiel dans ces deux laves est identique (5.9 % MgO), légèrement moins magnésienne que pour la bombe de la fissure 3, et nettement plus magnésienne que pour la lave de la fissure 2. La température calculée (1147 °C) est cohérente avec une plus faible cristallisation que pour la lave de la fissure 3, mais la comparaison est difficile car l'échantillon de la fissure 3 est possiblement mal trempé.

Les échantillons collectés aux fissures 2a et 2b (REU230906-1 et REU230906-2) sont des scories assez cristallisées, montrant une paragénèse semblable aux autres, mais caractérisés par des compositions du pyroxène et du plagioclase intermédiaires et surtout très variables. Les verres ont une composition moins magnésienne que ceux de la bombe de la fissure 3 (4,75-5,05 % MgO), indiquant un refroidissement plus poussé, ce qui est normal pour des scories par rapport aux ponces dorées.

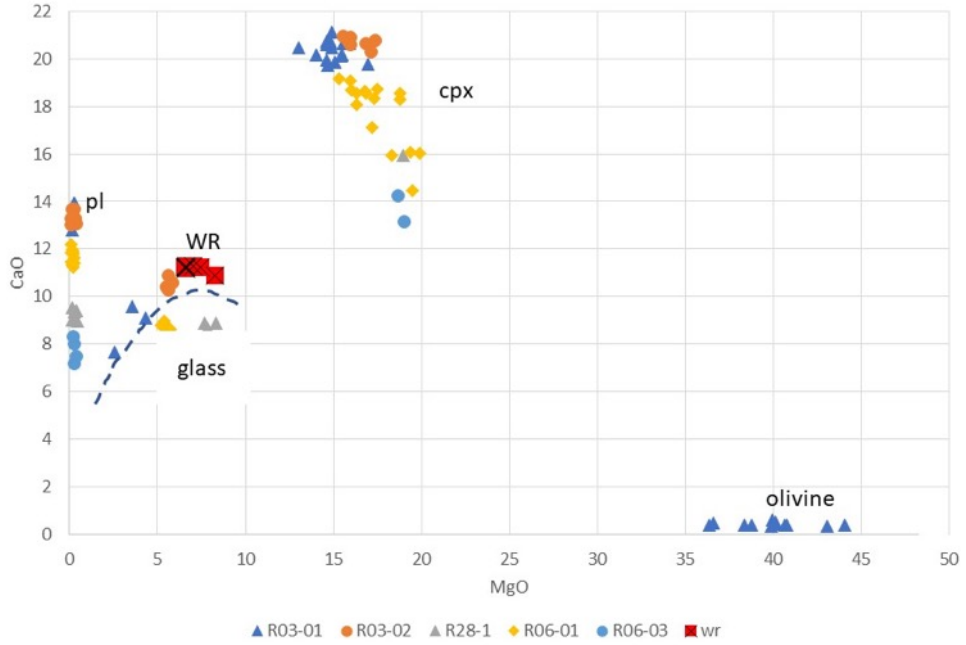

Figure 51 : Microanalyse des phases minérales et des verres rencontrées dans les différents échantillons.

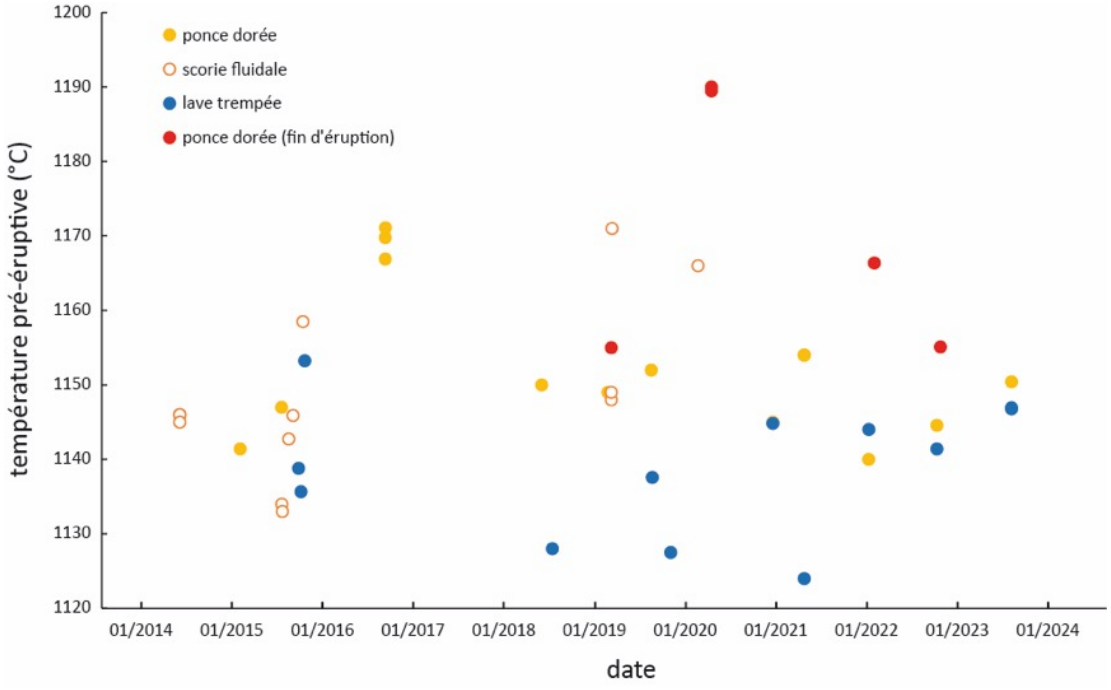

Figure 52 : Évolution des températures pré-éruptives (calculées à partir de la composition des verres, Rhéty et al. 2017) lors du cycle éruptif actuel, en fonction du type d'échantillons.

> Résumé

Les 8 échantillons collectés pendant l'éruption de juillet-août 2023, dont 3 fragments de lave (deux de la fissure 1 et un de la fissure 3) et 5 sacs de scories (prélevés sur les différentes fractures) ont été analysés en termes de porosité, de connectivité, de teneur en microphénocristaux, de pétrographie et de chimie. Les échantillons provenant des différentes fissures (Figure 41) montrent des variations de porosité, cristallinité et composition totale (Figures 44 et 47, Tableau 9). Les propriétés physiques des produits pyroclastiques sont liées à différents dynamismes éruptifs. Le dynamisme est strombolien pour les fissures 2a et 2b en accord avec la présence de scories épineuses (60% de porosité complètement connectée et plus riches en cristaux). La fissure 1 présente des scories opaques plutôt denses (50 % de porosité) et des scories fluidales à 58 % de porosité, mais avec la présence de vésicularité isolée, émise par des jets et/ou fontaines de lave (Figure 45). Laves et produits explosifs émis par la fissure 1 sont chimiquement homogènes. Par contre, la fissure 3 montre les variations les plus nettes de porosité, avec une lave très dense (37 % de porosité) et la présence de ponces dorées à 85 % de porosité, formées par une fontaine de lave.
Les trois fractures sont probablement alimentées par le même dike, mais la fracture 3 est caractérisée par les produits les plus mafiques (les plus primitifs). Elle montre la plus forte séparation entre les produits explosifs les plus riches en gaz et les laves les plus dégazées.
La composition des magmas est très similaire à celle des éruptions précédentes, cependant, une possible faible évolution devra être confirmée lors de la prochaine éruption (augmentation du rapport Ca/Al, Figure 47, inversion de la tendance d'évolution des compositions isotopiques, Figure 48).

Références :

Albert, H., Costa, F., Di Muro, A., Herrin, Scott, J., Deloule, E., Métrich, N. (2019b). Magma interactions, crystal mush formation, timescales, and unrest during caldera collapse and lateral eruption at ocean island basaltic volcanoes (Piton de la Fournaise, La Reunion). Earth and Planetary Science Letters; 515:187-199.

Bénard, B., A. Di Muro, M. Liuzzo, S. Gurrieri, P. Boissier, C. Brunet et al. (2023), Seasonal environmental controls on soil CO_2 dynamics at a high CO_2 flux sites (Piton de la Fournaise and Mayotte volcanoes), Journal of Geophysical Research: Biogeosciences, 128(6), e2023JG007409.

Boudoire, G., Di Muro, A., Metrich, N., Michon, L., Sundermeyer, C., Wörner, G. (2021i) Multistep magma ascent, evolution and degassing at ocean basaltic volcanoes: new insights from the Piton de la Fournaise volcano (La Réunion Island, Indian Ocean). Bulletin of Volcanology, 83, 12, 1-31.

Boudoire, G., Brugier, Y.A., Di Muro, A., Wörner, G., Arienzo, I., Metrich, N., Zanon, V., Braukmüller, N., Kronz, A., Le Moigne, Y., Michon, L., Pichavant, M. (2019d) Deep magma storage and migration at oceanic volcanic islands: insights from Piton de la Fournaise (La Réunion Island, Indian Ocean). Journal of Petrology, 1-36.

Colombier, M., Vasseur, J., Houghton, B., Caceres, F., Scheu, B., Kueppers, U., Gurioli, L., Thivet, S., Montanaro, C., Soldati, A., Di Muro, A., Dingwell, B. D. (2021). Degassing and gas percolation in basaltic magmas. Earth and Planetary Science Letters, 573, 117134.

Colombier, M., Wadsworth, F.B., Gurioli, L., Scheu, B., Kueppers, U., Di Muro, A., Dingwell, D.B. (2017) The evolution of pore connectivity in magma. Earth and Planetary Science Letters, 462: 99-109.

Coppola, D., Di Muro, A., Villeneuve, N., Ferrazzini, V., Peltier, A., Favalli, M., Bachèlery, P., Gurioli, L., Harris, A.J.L., Moune, S., Vlastélic, I., Galle, B., Arellano, S., Aiuppa, S. (2017d) Shallow system rejuvenation and magma discharge cycles at Piton de la Fournaise volcano (La Réunion Island). Earth and Planetary Science Letters; 463: 13-24.

Chevrel, M.O., Favalli, M., Villeneuve, N., Harris, A., Fornaciai, A., Richter, N., Derrien, A., Boissier, P., Peltier, A., Di Muro, A. (2021e) Lava flow hazard maps at Piton de la Fournaise volcano. Natural Hazards, 21, 1-22

Di Muro, A., Schwarzmüller, F., Küppers, U., Heap, M., Dingwell, D.B. (2021c). Petrophysical characterisation of volcanic ejecta to constrain subsurface lithologies: implications for edifice stability at basaltic volcanoes. Vulcanica, vol. 4 (1), 41-66.

Di Muro, A., Métrich, N., Vergani, D., Rosi, M., Armienti, P., Fougeroux, T., Deloule, E., Arienzo, I., Civetta, L. (2014c) The shallow plumbing system of Piton de la Fournaise Volcano (La Réunion Island, Indian Ocean) revealed by the major 2007 caldera forming eruption. Journal of Petrology, 55, 1287-1315.

Gurioli, L., Di Muro, A., Vlastelic, I., Moune, S., Villeneuve, N., Bachelery, P.,Valer, M., Thivet, S., Boudoire, G., Métrich, M., Peltier, A., Ferrazzini, V., Jordan, S.,Leibrandt, S., Benbakkar, M., Constantin, C., Devidal, J.L., Fonquernie, C., Hénot,

J.M. (2018a). Integrating field, textural, and geochemical monitoring to track eruption triggers and dynamics: a case study from Piton de la Fournaise. Solid Earth, 9: 1-25.

Harris, A.J.H., Mannini, S., Thivet, S., Gurioli, L., Villeneuve, N., Di Muro, A., Peltier, A. (2020b) How shear helps lava to flow. Geology; v. 48, 154-158

Harris, A.J.L., Villeneuve, N., Di Muro, A., Ferrazzini, V., Peltier, A., Coppola, D., Favalli, M., Bachèlery, P., Gurioli, L., Moune, S., Vlastélic, I., Galle, B., Arellano, S. (2017f) Effusive Crises at Piton de la Fournaise 201-2015 : a multi-national response model. Journal of Applied Volcanology, 6: 11

Harris, A.J.L., Chevrel, M.O, Coppola, D., Ramsey, M.S., Hrysiewicz, A., Thivet, S., Villeneuve, N., Favalli, M., Peltier, A., Kowalski, Ph, Di Muro, A., Froger, J-L, Gurioli, L. (2018d) 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, 61 DOI: 10.4401/ag-7972.

Kolzenburg, S., Giordano, D., Di Muro, A., Dingwell, D.B. (2019a) Equilibrium Viscosity and Disequilibrium Rheology of a high Magnesium Basalt from Piton de La Fournaise volcano, La Reunion, Indian Ocean, France; Submitted to: Annals of Geophysics; Special volume: "New analytical techniques for understanding volcanic systems, from magma generation to the emplacement of volcanic products".

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

Sundermeyer, C., Di Muro, A., Gordeychick, B., Wörner, G. (2020a) Timescales of magmatic processes during the eruptive cycle 2014-2015 at Piton de la Fournaise, La Réunion, obtained from Mg-Fe diffusion modelling in olivine. Contributions to Mineralogy and Petrology, 175:1

Thivet, S., Gurioli, L., Di Muro, A., Eychenne, J., Besson, P., Nedelec, J-M. (2020a). Variability of ash deposits at Piton de la Fournaise (La Reunion Island): insights into fragmentation processes at basaltic shield volcanoes. Bulletin of Volcanology, 82 (63).

Thivet, S., Gurioli, L., Di Muro, A. (2020b) Basaltic dyke eruptions at Piton de La Fournaise: characterization of the eruptive products with implications for reservoir conditions, conduit processes and eruptive dynamics. Contributions to Mineralogy and Petrology, 175, 1-24.

Thivet, S., Gurioli, L., Di Muro, A., Derrien, A., Ferrazzini, V., Gouhier, M., Coppola, D., Galle, B., Arellano, S. (2020c) Evidences of plug pressurization enhancing magma fragmentation during the September 2016 basaltic eruption at Piton de la Fournaise (La Réunion Island, France). G3, 21

Vlastélic, I., Di Muro, A., Bachèlery, P., Gurioli, L., Auclair, D., Gannoun, A. (2018e) Mantle fertility controls eruptive cycles of Piton de la Fournaise volcano (La Réunion). Scientific Reports, 8: 14478 https://www.nature.com/articles/s41598-018-32809-0

Vlastelic, I., Gannoun, M., Di Muro, A., Gurioli, L., Bachelery, P., Henot, J.M. (2016d) Origin and fate of sulphide liquids in hotspot volcanism (La Réunion): Pb isotope constraints from residual Fe-Cu oxides. Geochimica and Cosmochimica Acta, 194: 179-192.

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 2023, OI2 (Observatoire InSAR de l'Ocean Indien) a contribué au suivi de l'éruption du 2 juillet au 10 août 2023 en fournissant à l'OVPF des interférogrammes Sentinel-1, ALOS-2 et PAZ. Ces données ont permis d'imager les déplacements du sol induits par l'éruption (Figure 53).

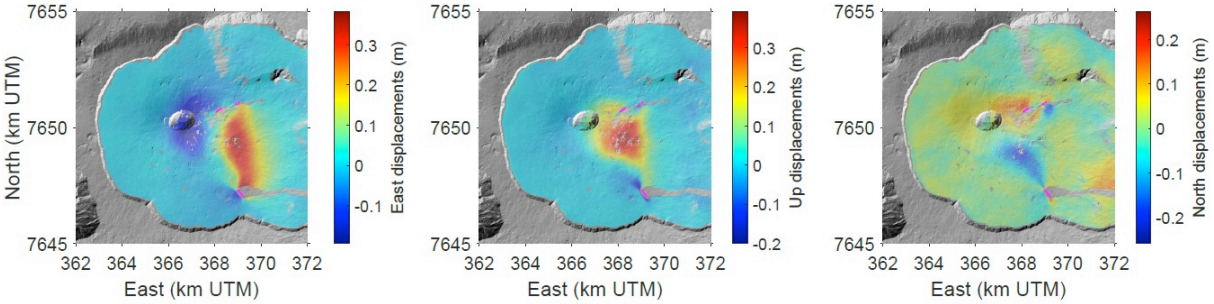

Figure 53 : Composantes est-ouest, verticales et nord-sud des déplacements du sol induits par l'éruption de juillet 2023 inversées à partir de 6 interférogrammes indépendants (5 interférogrammes ALOS-2 Spotlight et 1 interférogramme PAZ Spotlight, Com. Pers. Quentin Dumont).

L'inversion des déplacements mesurés à partir des interférogrammes a permis de modéliser la source des déplacements. Le meilleur modèle consiste dans la combinaison d'un sill sous le flanc sud-est du volcan, d'un dike alimentant les fissures nord et d'une transition d'un sill à un dike pour l'alimentation des fissures sud (Figure 54).

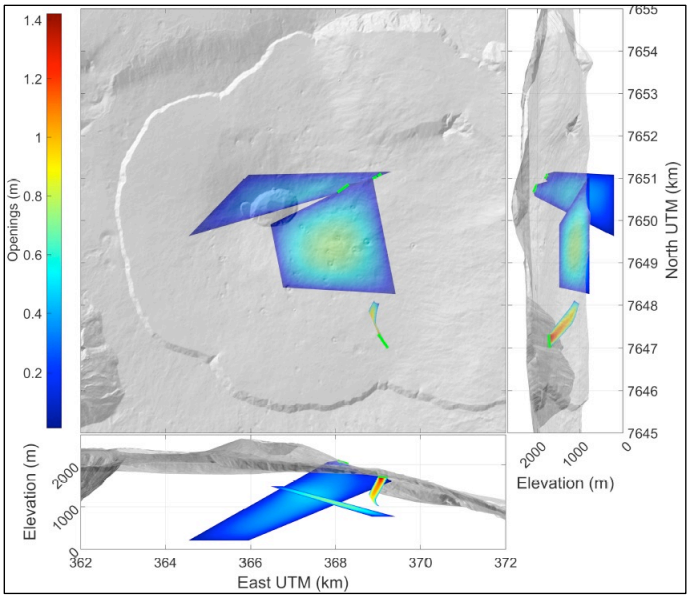

Figure 54 : Meilleur modèle de source pour les déplacements co-éruptifs de Juillet 2023 obtenu par inversion des déplacements du sol mesurés sur 6 interférogrammes indépendants (5 interférogrammes ALOS-2 Spotlight et 1 interférogramme PAZ Spotlight, Com. Pers. Quentin Dumont).

Le Service OI2 a aussi contribué au suivi de la mise en place des coulées de lave émises pendant l'éruption de juillet 2023 (Figures 55 et 56). Les contours des coulées ont été cartographiés automatiquement à partir des images de cohérence interférométrique pour 7 dates différentes (cf. section 3). Ce suivi InSAR de la coulée de lave a été particulièrement utile pendant les épisodes de forte couverture nuageuse où la visibilité depuis le rempart du Tremblet (limite sud de l'Enclos Fouqué) était extrêmement réduite.

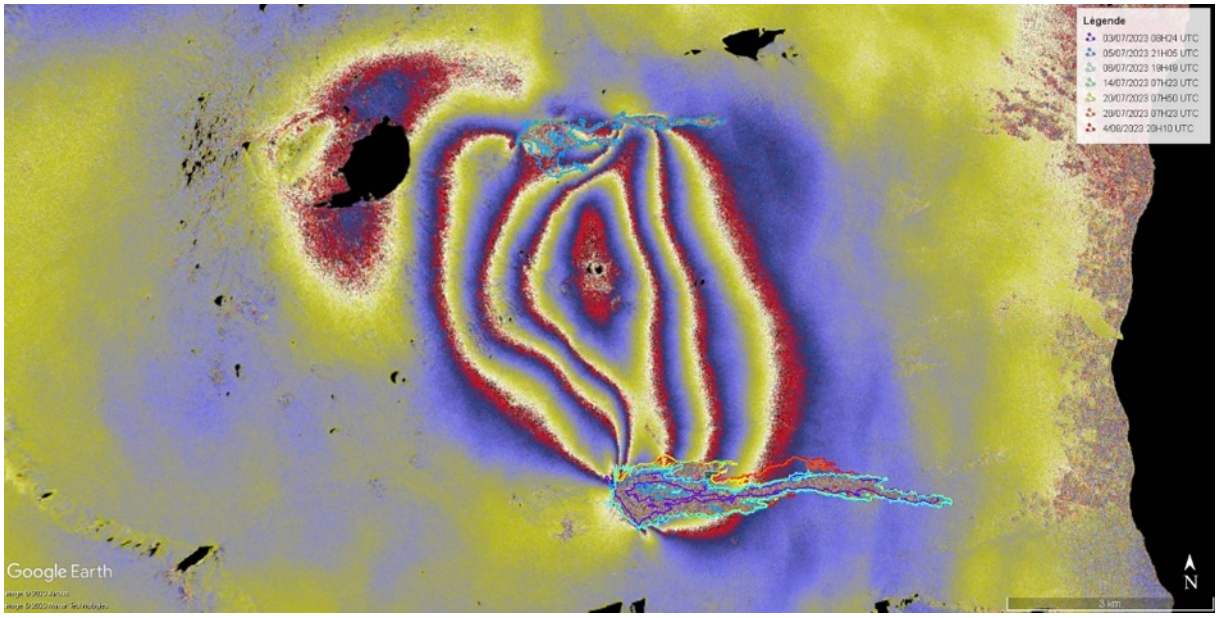

Figure 55 : Contours des coulées de lave nord et sud de l'éruption de Juillet 2023 superposés à un interférogramme ALOS-2 Spotlight Descending Right couvrant la période du 30 juin 2023 au 14 juillet 2023. Tous ces contours ont été calculés à partir des données INSAR ALOS-2 Spotlight.

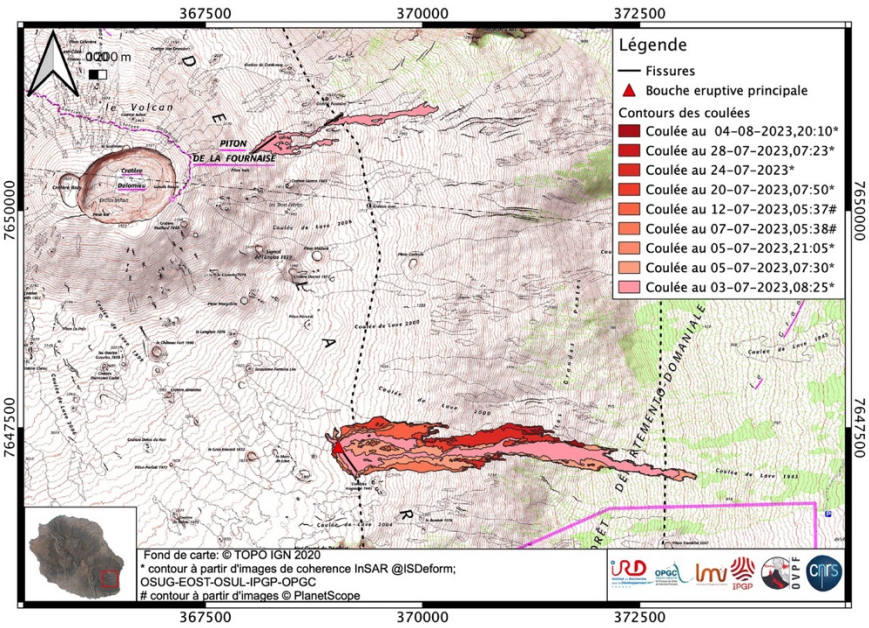

Figure 56 : Cartographie des coulées de lave émises en 2023 avec l'évolution des écoulements de lave cartographiés à partir de données satellites entre le 03/07/2023 et le 28/07/2023 (© ISDeform, OSUG-EOST-OSUL-IPGP-OPGC).

En dehors du suivi de l'éruption de juillet 2023, les activités d'OI2 en 2023 ont consisté principalement en la poursuite des acquisitions systématiques de données InSAR Sentinel-1, ALOS-2, PAZ et TSX sur le Piton de la Fournaise. Nous avons en particulier entrepris le rapatriement d'une quantité importante d'images ALOS-2 Spotlight acquises en 2021-2022. Ce rapatriement va se poursuive pour les données acquises en 2023 puis 2024. Il s'effectue dans le cadre d'une collaboration avec des collègues de l'Agence Spatiale Européenne (ESTEC, Noordwijk, Pays-Bas), qui permet l'accès quasi sans restriction, mais avec un certain délai, à l'ensemble des données ALOS-2 acquises sur La Fournaise. La base de données d'images radar haute résolution en bande L que nous sommes en train de construire de cette façon, pourra ensuite être exploitée pour caractériser les déplacements inter-éruptifs, à l'intérieur ou à l'extérieur de l'Enclos Fouqué, par des calculs de séries temporelles.

Articles utilisant les données du SO OI2 publié ou soumis en 2023 :

Chevrel, M.O., N. Villeneuve, R. Grandin, J.-L. Froger, D. Coppola, F. Massimetti, A. Campus, A. Hrysiewicz and A. Peltier (2023), Report on the lava flow daily monitoring of the 19 September–05 October 2022 eruption at Piton de la Fournaise. Volcanica Journal, Vol. 6 N°2, DOI: 10.30909/vol.06.02.391404

Federico Galetto, F., E., Dualeh, F., Delgado, M., Pritchard, S., Ebmeier, M., Poland, T., Shreve, J., Biggs, I., Hamling, C., Wauthier, J., Maria Gonzalez Santana, J.-L., Froger (2023), The utility of TerraSAR-X, TanDEM-X, and PAZ for studying global volcanic activity: Successes, challenges, and future prospects, OSF. September 15. osf.io/35xud.

Dumont Q., V., Cayol and J.-L. Froger (2023), Is stress monitoring able to forecast intrusions and slip events at Piton de la Fournaise volcano ? Earth and Planetary Science Letters 626, DOI: 10.1016/j.epsl.2023.118494

> Images de la constellation PlanetScope

Comme pour l'éruption du 19 septembre – 5 octobre 2023, des images optiques à haute résolution acquises quotidiennement par des micro satellites commerciaux de la constellation PlanetScope ont été utilisées lors de l'éruption du 2 juillet – 10 août 2023.

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.
Les produits SuperDrove de PlanetScope sont protégés par le copyright de la société Planet, et ont été mis à disposition de l'OVPF par Raphaël Grandin (IPGP) sous la licence standard d'éducation et de recherche n°81527.

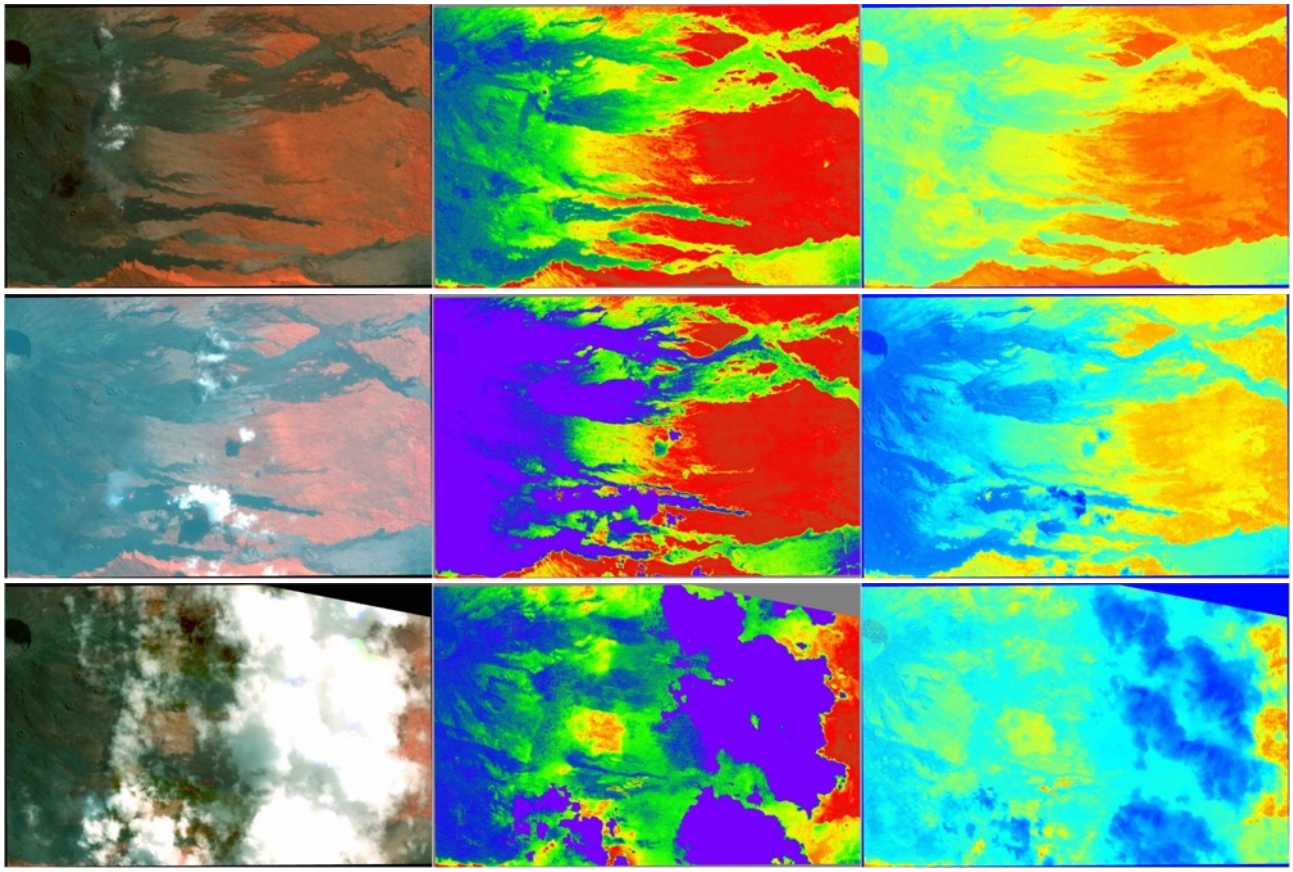

Figure 57 : Exemple d'images Planetscope acquises les 7 juillet (en haut), 12 juillet (au milieu) et 24 juillet (en bas) en bandes RVB fausses couleurs (à gauche), avec un indice de végétation triangulaire à bord rouge (RTVI, au milieu) et avec un indice de végétation par différence normalisé (NVDI, à droite) (©PlanetScope ©ISDeform, OSUG-EOST-OSUL-IPGP-OPGC).

> L'optique

Stéréophotogrammétrie à partir d'images satellites, drone et ULM

Le relevé aérien ou spatial 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 satellite, d'un avion, d'un hélicoptère, d'un ULM ou d'un drone, les images 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 (V2.1.0). 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 de manière non systématique car les sites d'éruption peuvent être à plusieurs heures de marche.

Lors de l'éruption du 2 juillet au 10 août 2023, le calendrier, la localisation de l'évent et les conditions météorologiques ont rendu très difficiles les acquisitions.

Une seule acquisition a été réalisée pour cette éruption. Il s'agit d'une tri-stéréo du satellite pléiade du 07/07/2023. Le MNS calculé a été comparé avec un MNS de 2022 pour obtenir les épaisseurs des laves mises en place en début d'éruption (Figure 58).

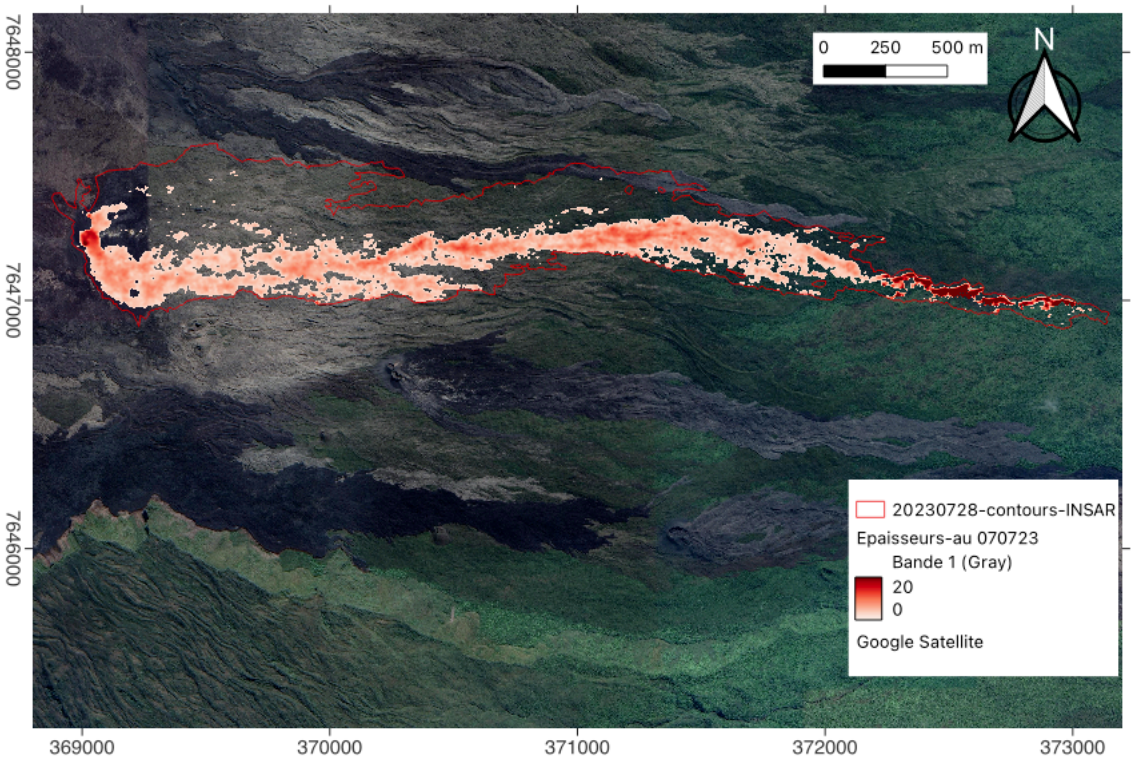

Figure 58 : Épaisseur de la coulée de lave au 07 juillet 2023. MNS obtenus à partir d'images Pléiades.

> Le Multi-spectral

Détection des panaches de SO_2

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 présentes dans l'atmosphère lors des éruptions du Piton de la Fournaise. 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 $1{,}15.10^6$ km^2) plus ou moins centrée sur La Réunion.
Sur la Figure 59 il est notable que les données des trois capteurs montrent des tendances comparables même si TROPOMI est plus sensible que les deux autres dans les faibles concentrations. Il est également notable qu'un dégazage important a été observé en début d'éruption suivi d'une baisse significative. En début d'éruption, le 3 juillet 2023, un pic de SO_2 a été mesuré par deux des trois capteurs et a atteint un maximum de 1.717 KT pour OMPS et 1.6044 KT pour TROPOMI dans la zone d'intérêt étudiée. Pour OMI, la trajectoire du satellite n'a pas permis de procéder à une mesure. La valeur enregistrée le 3 juillet par OMPS est la vingtième valeur la plus importante jamais enregistrée (rappelons que seulement 24 éruptions sont survenues depuis la mise en orbite du satellite). Pour TROPOMI il s'agit de la 15ième valeur la plus importante mesurée au Piton de la Fournaise depuis la mise en orbite du satellite et le suivi de 13 éruptions.

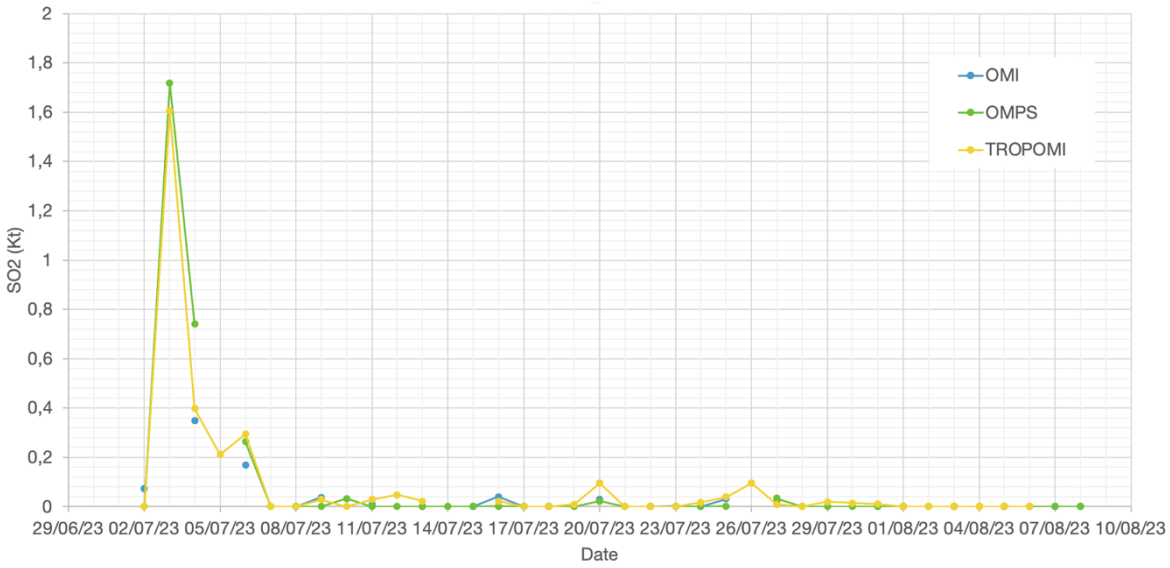

Figure 59 : Évolution de la masse de SO_2 (en kton) intégrée dans une zone d'intérêt de 5°X5° et mesurée par trois capteurs différents OMI, OMPS et TROPOMI.

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 Turin) 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. Figure *60* pour l'éruption du 22 septembre – 5 octobre 2022).

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

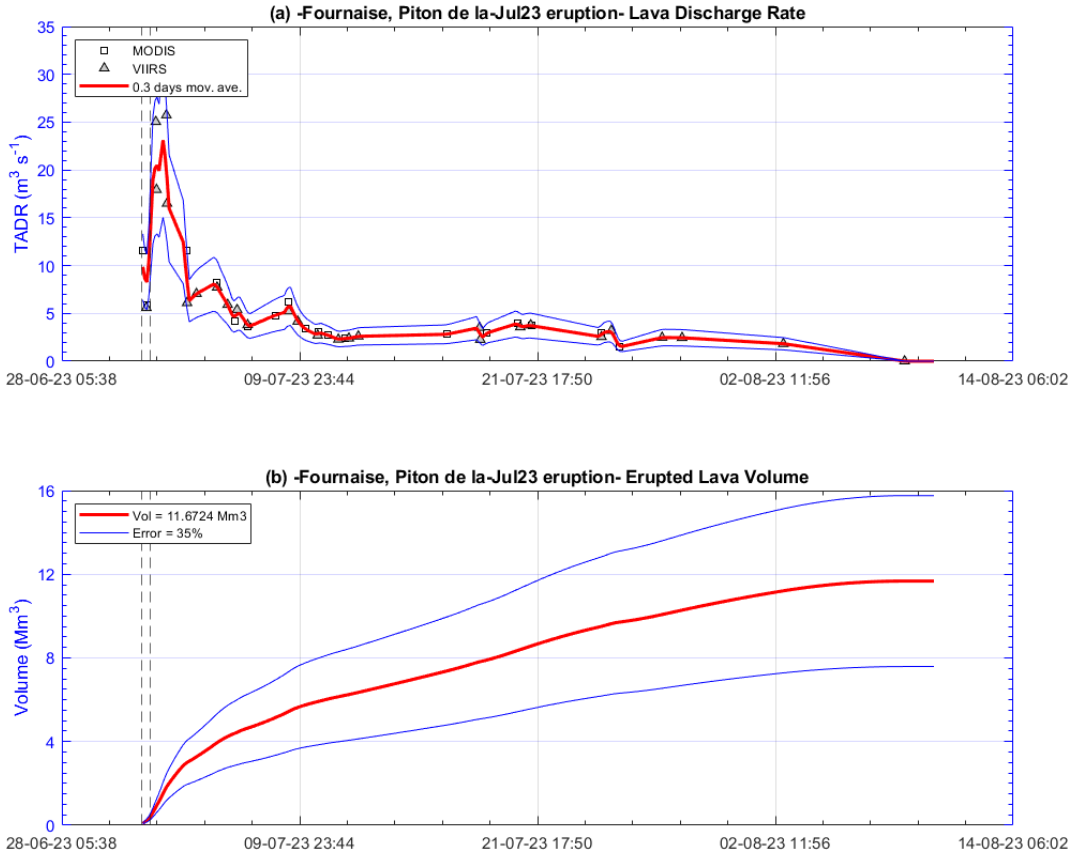

Figure 60 : Évolution des débits (en haut) et du volume cumulé lors de l'éruption du 2 juillet – 10 août 2023 estimés à partir des images satellites (©MIROVA, Université de Turin).

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 (données texte au format ASCII csv) et mis à disposition de l'OVPF pour le suivi opérationnel des éruptions.

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

Éruption du 2 juillet – 10 août 20203

La première anomalie thermique est détectée (via le produit : Lava hotspot / NTI*) à 04h45 UTC avec une TSR (Total Spectral Radiance) de 1,87 W/m^2/sr/µm, témoignant d'un niveau d'activité faible (code couleur : vert). La dernière acquisition survient le 27 juillet à 23h15 UTC, correspondant à une durée totale de 26 jours. La TSR max est mesurée le 3 juillet (09h15 UTC) à une valeur de 6,06 W/m^2/sr/µm, témoignant d'un niveau d'activité fort (code couleur : rouge)

Le débit lavique initial, calculé en opérationnel sur la première journée d'éruption (02/07) donne une valeur moyenne de 25 m³/s. Les débits conservent une valeur importante (10-20 m³/s) du 04 au 06 juillet, avant de chuter brutalement (Figure 61). Les valeurs de débits sont faibles mais stables à environ 5 m³/s du 06 au 14 juillet. A partir du 14 juillet, les détections sont rares et l'estimation des débits très ponctuelles sur les journées du 16-17, 20, 25 et 27 juillet.

Les 26 jours d'acquisition représentent le traitement de 2496 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 satellitaires.

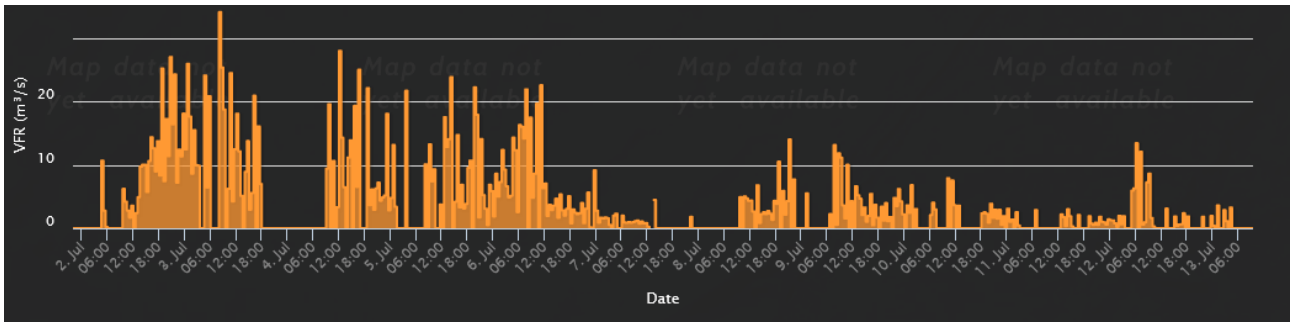

Figure 61 : Série temporelle du débit lavique au Piton de la Fournaise (La Réunion) calculé à partir des données MSG-SEVIRI via l'interface HOTVOLC entre le 2 juillet et le 13 juillet 2023.

Références :

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.

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 112 capteurs et 70 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 de l'OVPF 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 de l'OVPF 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 le projet de recherche porté par l'équipe scientifique de l'OVPF : HATARI (cf. section 9) - études, conception, réalisation et installation des stations ; projet DAS - 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 multi-capteurs 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 que pour 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 l'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, ainsi qu'aux astreintes renforcées lors des éruptions. Localisation des séismes du REVOSIMA pour certains personnels.

> 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 de 112 capteurs (Figures 62, 63 et 64) répartis sur 70 sites sur lesquels les différentes disciplines et expertises scientifiques peuvent s'appuyer. Le nombre de capteurs et de sites est relativement stable (2022 : 108 capteurs, 69 sites). A ces 70 sites se rajoutent 5 sites occupés par des relais de transmission sans capteur.

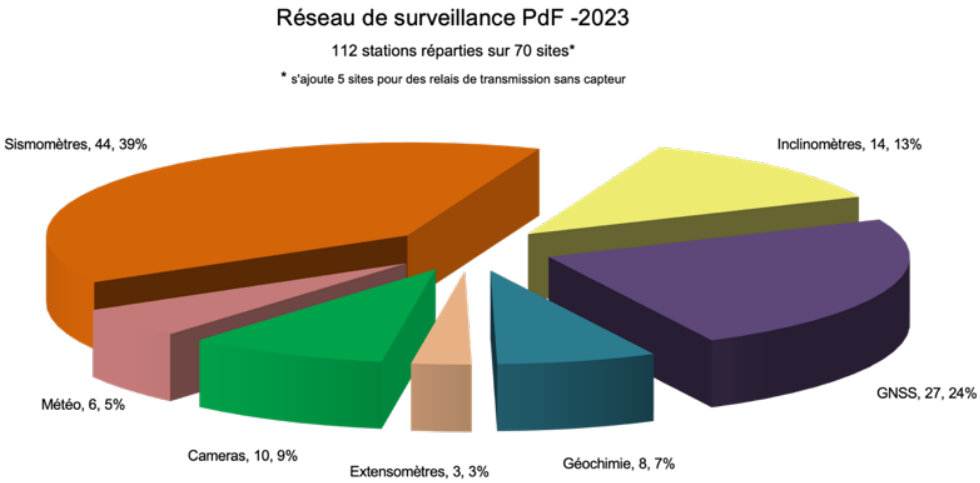

Figure 62 : Répartition des capteurs du réseau de surveillance de l'OVPF en 2023 (capteur, quantité et pourcentage).

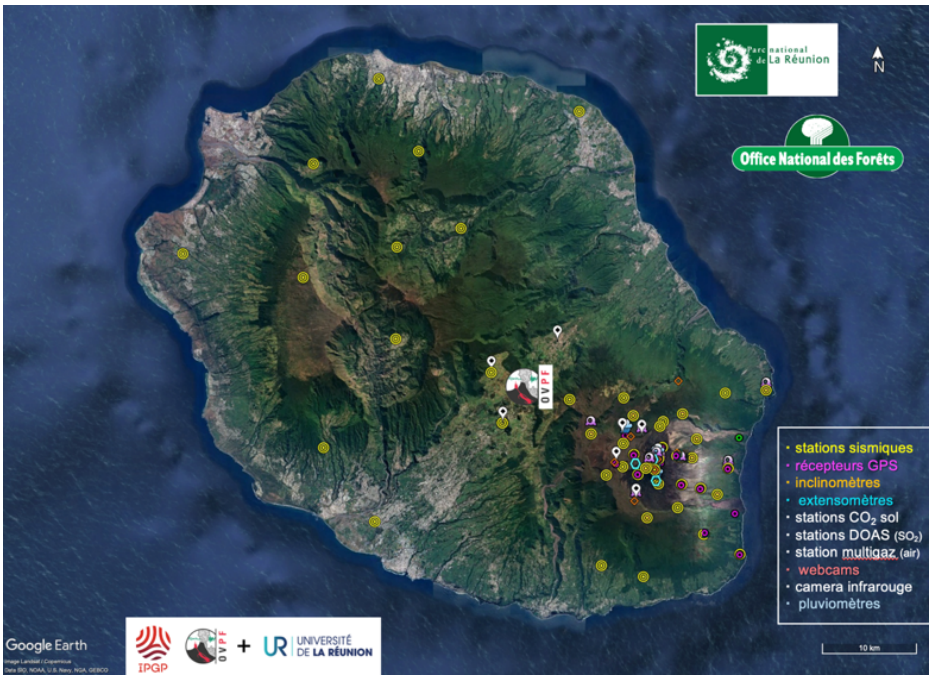

Figure 63 : Carte du réseau de surveillance de l'OVPF en 2023.

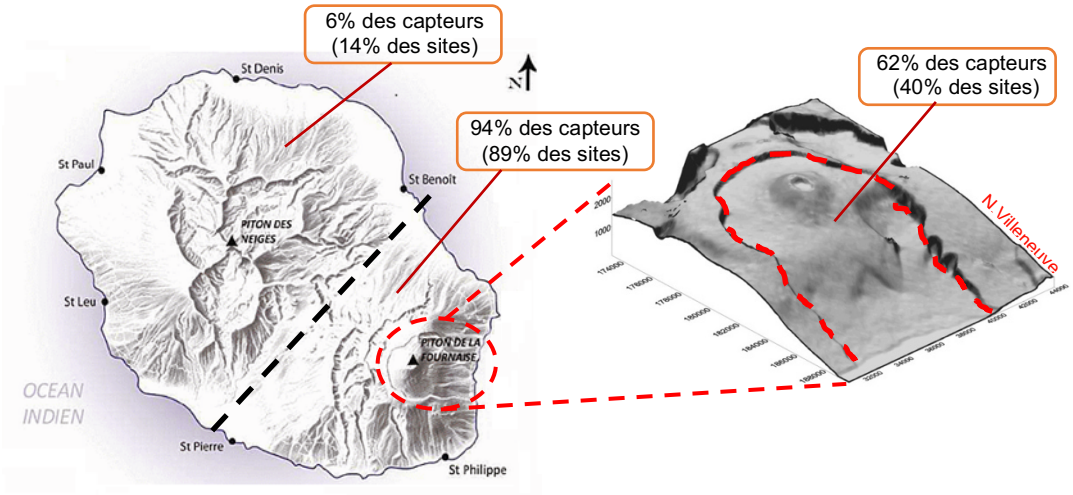

Figure 64 : Répartition géographique des capteurs du réseau de surveillance de l'OVPF en 2023. L'Enclos Fouqué, les Grandes Pentes et le Grand Brûlé concentrent 62% des capteurs (~ 1 capteur/2km² et 1 site/3km²) ; et le massif du Piton de la Fournaise dans son ensemble, 94% des capteurs.

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, 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 (1 seule station est concernée par des relevés de données manuels).

Nouvelle station et nouveaux capteurs

Une nouvelle station, CFN (cratère Fontaine) a été installée fin 2023 pour remplacer la station FLR détruite lors de l'éruption d'avril 2020 (Figures 65). Avec des conditions météorologiques souvent difficiles sur le flanc Est du volcan, l'installation a été repoussée à de nombreuses reprises depuis 2022.

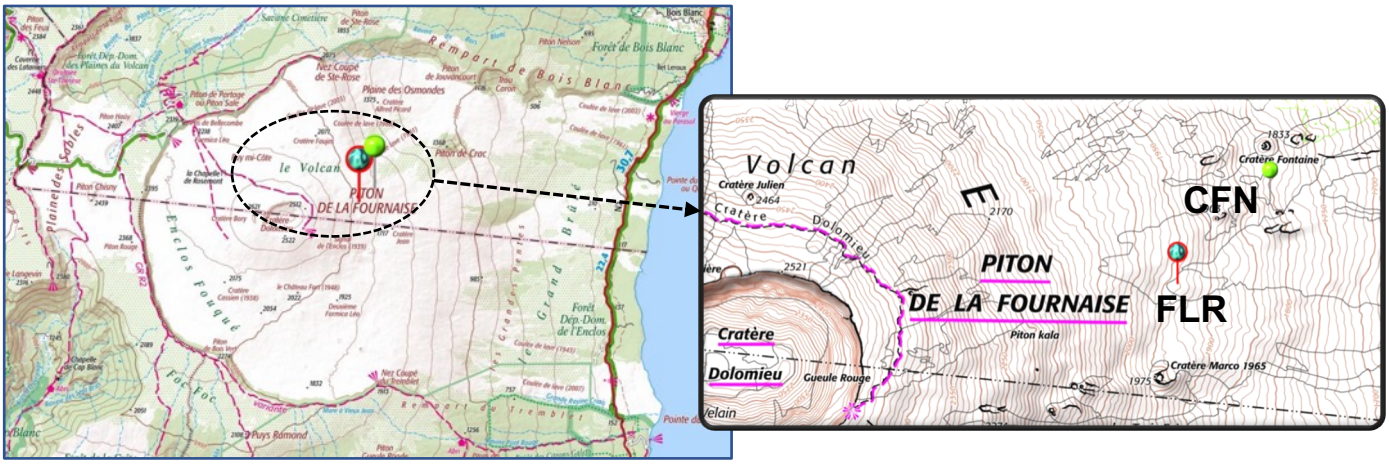

Figure 65 : Localisation de la nouvelle station CFN venant remplacer la station FLR détruite lors de l'éruption d'avril 2020.

CFN accueille 6 capteurs (Figures 66) :

- 1 sismomètre 3 composantes large bande
- 1 récepteur GNSS
- 1 inclinomètre 2 composantes de type Spectron
- 1 station météorologique
- 1 pluviomètre à auget
- 1 camera PTZ

Deux structures avec au total 600W de panneaux solaires et 8 batteries de 100Ah assurent les ressources en énergie. Un double équipement Wifi et 4G permet de réduire le taux de panne et de réaliser de la télémaintenance sur les liaisons principale. A terme, un capteur géochimique de type Novac et un capteur magnéto-tellurique compléteront la station.

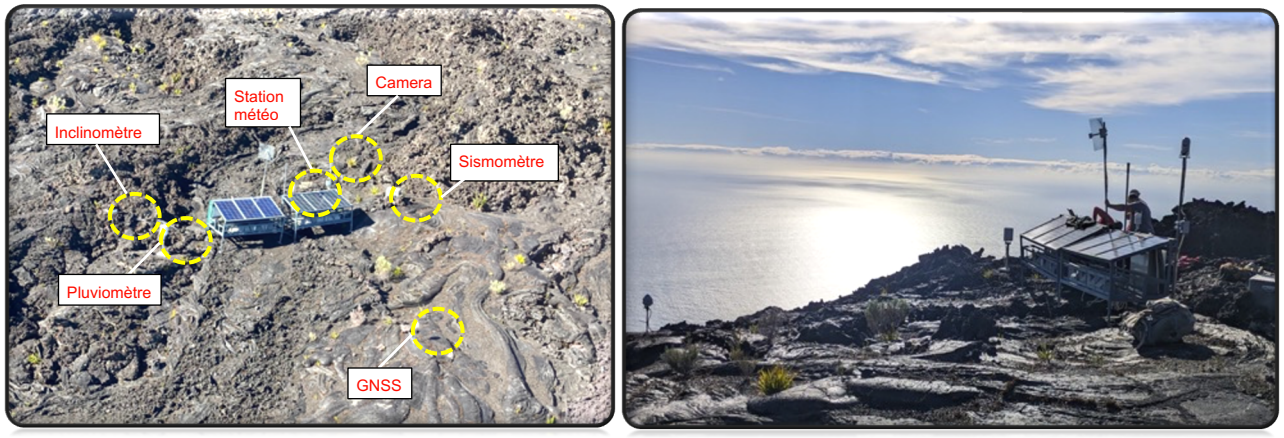

Figure 66 : Photographies de la station CFN installée en 2023 avec les différents capteurs.

La station TKR, hors Enclos Fouqué (Figure 67), a quant à elle été modernisée. Initialement équipée d'un sismomètre courte-période 1 composante et d'une transmission analogique, cette station accueille maintenant un sismomètre large-bande 3 composantes et un récepteur GNSS. Tout comme CFN, un double équipement Wifi et 4G permet de garantir la transmission des données en temps réel.

Figure 67 : Modernisation de la station hors Enclos, TKR. A gauche : localisation, à droite : installation.

Interventions

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.

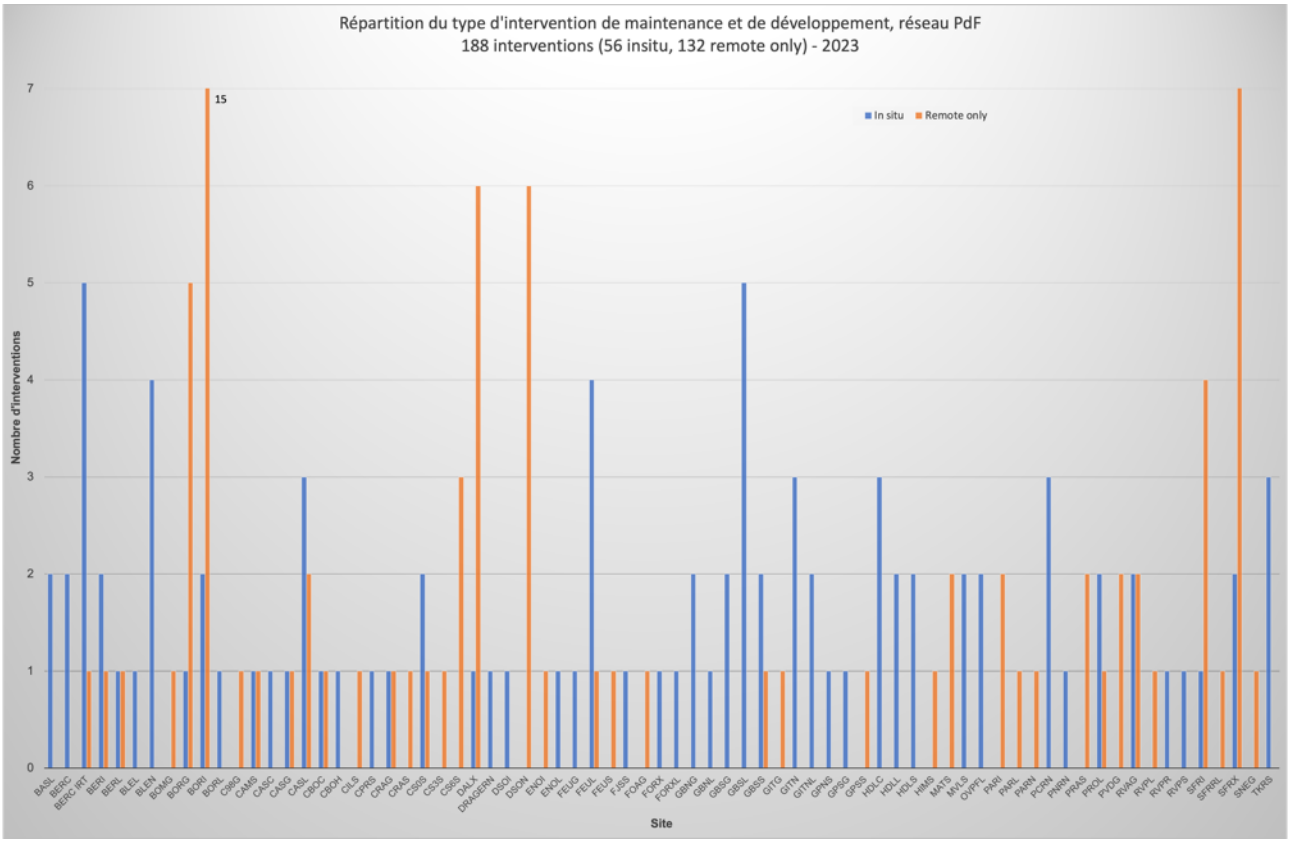

Figure 68 : Répartition entre interventions in situ (en bleu) et à distance (remote only ; en orange) sur les différentes stations du réseau de l'OVPF.

Les interventions se font donc également par télémaintenance, c'est-à-dire à distance depuis l'observatoire. Le module de recherche 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, etc.). Ces interventions à distance représentent 51,6% (97 interventions) du total des interventions (contre 38,6%, 119, en 2022).

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.

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, etc.) 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 chaîne instrumentale : dans un contexte de matériel industriel rapidement obsolète, une pérennité des éléments hardware et software est ainsi assurée.

Le nombre d'intervention (Figure 69) sur le réseau de surveillance est en baisse par rapport à l'année 2022 (188) avec une diminution d'environ 52% pour un nombre de capteurs en légère hausse (+3,7%). Ces chiffres sont à relativiser avec des conditions météorologiques souvent pluvieuses ou orageuses pour l'année 2023 ne permettant pas des interventions in situ sur les équipements électriques et électroniques.

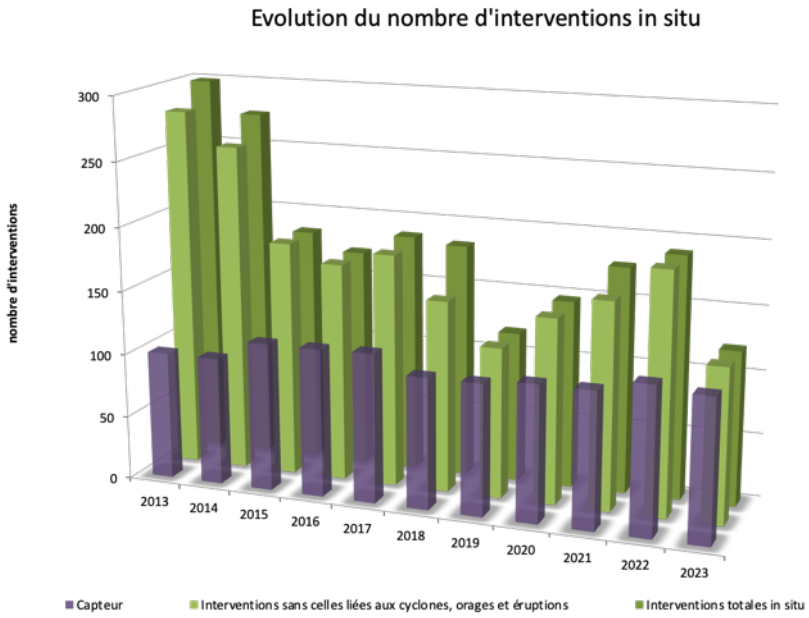

Figure 69 : Évolution du nombre d'interventions sur le réseau de surveillance de 2013 à 2023 avec un nombre total de capteurs relativement stable (14 capteurs supplémentaires entre 2015 et 2018 issus de l'ERC Slidequakes, 8 capteurs supplémentaires en 2022 issus du projet de recherche BlueSeis et 6 nouveaux capteurs en 2023). La maîtrise des interventions reflète les améliorations réalisées sur les infrastructures (structure des stations, gestion de l'énergie et protections foudre), la robustesse du matériel (capteurs et 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.

Capteurs et équipements

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 70).

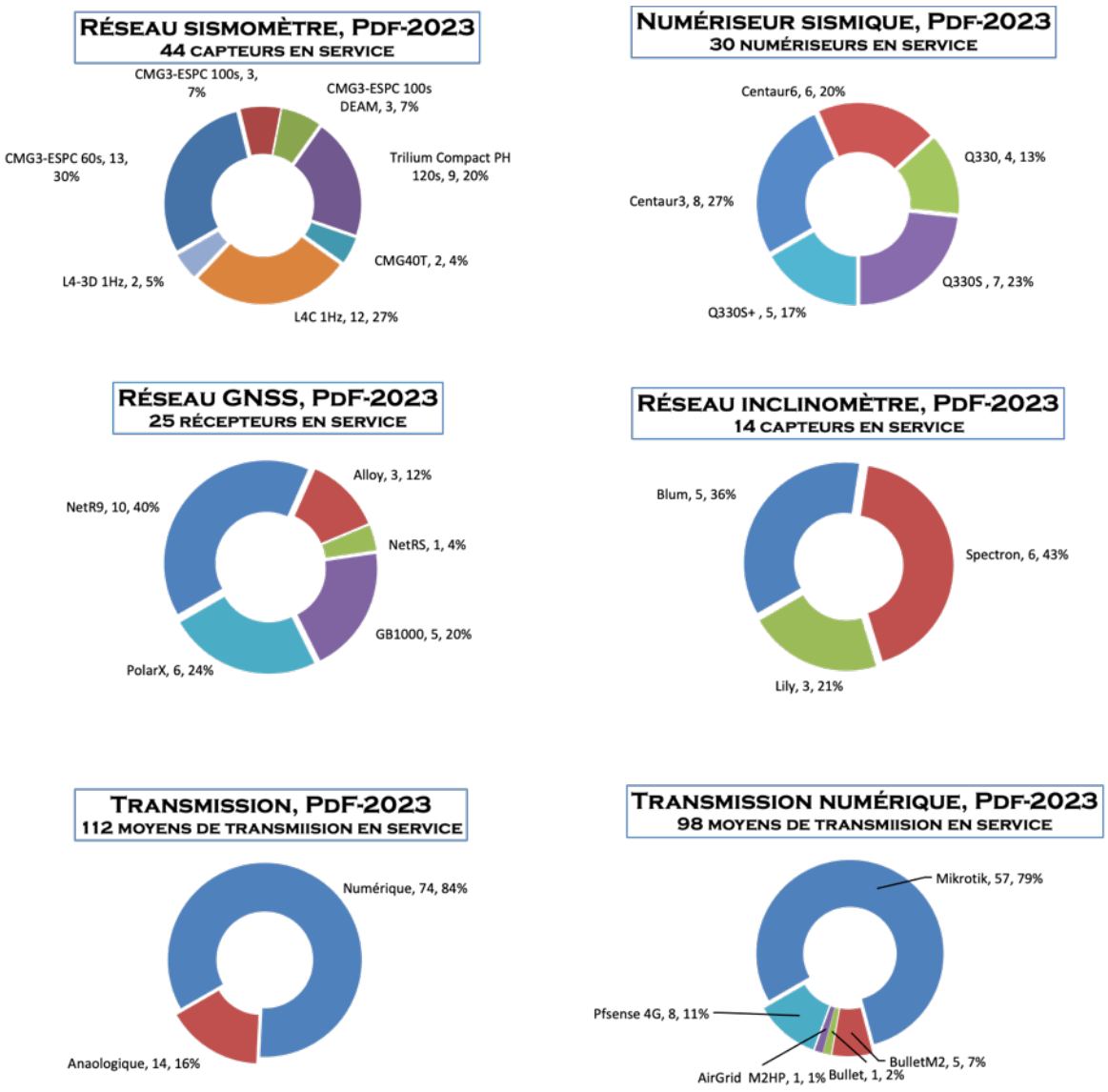

Figure 70 : Répartition des équipements géophysiques des réseaux sismique, géodésique et des moyens de transmission (équipement, nombre, pourcentage).

Interventions sur le réseau de surveillance

Ci-dessous les principales interventions suivants les réseaux considérés (nombre d'interventions, pourcentage) et leurs répartition (Figure 71). A noter qu'à chaque installation ou démontage complet d'une station ou un remplacement d'équipement (batterie, antenne, électronique, etc.) tous les déchets sont évacués et suivent une filière agréée pour leur recyclage et leur traitement suivant la règlementation en vigueur.

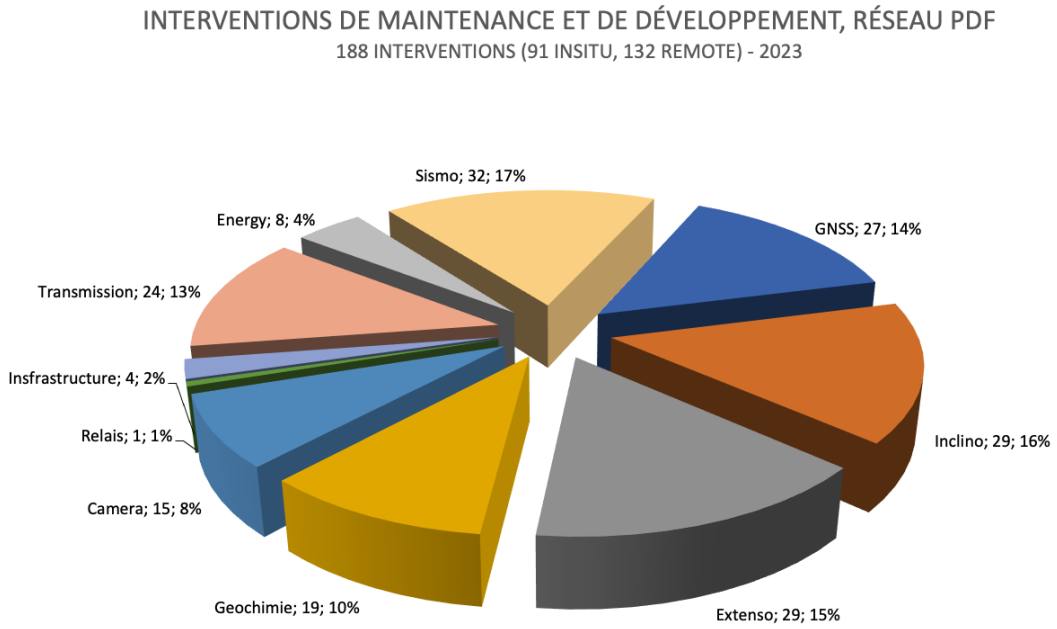

Figure 71 : Répartition des interventions sur les stations suivants les disciplines (nombre d'interventions, %) pour l'année 2023.

Sismologie

Interventions : 32, 17%

- CAM (Collège de Cambuston, St André) : remplacement du numériseur
- CAM (Collège de Cambuston, St André), CIL (SDIS, Cilaos), GBS (Grand Brulé Sud, Grand Brulé), MAT (Collège Henri Matisse, St Pierre) : mise à jour des numériseurs (bug du « GPS week roll-over GPS »)
- GBS (Grand Brulé Sud, Grand Brulé) : démontage et installation du sismomètre et du numériseur suite à l'éruption de juillet 2023
- GPN (Grande Pente Nord, Grande Pente) : correction de l'orientation du sismomètre
- HDL (Hubert Delisle, Grand Brulé) : remplacement du sismomètre
- MVL (Musée de Villèle, St Gilles-les-Hauts) : démontage de la station suite aux travaux planifiés par le musée

S'ajoutent à cela des interventions à distance pour le centrage ponctuel des masses des sismomètres, le redémarrage ou la reconfiguration des numériseurs.

La complétude des données sismiques est également assurée avec la récupération des données non télétransmises (transmission en panne, etc.) pendant l'année et le 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 REVOSIMA (présenté en section 11).

Géodésie

Interventions : 27, 14.4%

Mises à jour des firmwares des numériseurs GNSS des stations suivantes :

- BOMG (Bory Nord, Sommet)
- C98G (Coulée de 1998, Nord hors Enclos)
- CASG (Piton des Cascades, Ste rose)
- PVDG (Piton Parvedi, Enclos)
- RVAG (Cratère Rivals, Enclos)

Remplacement des récepteurs GNSS en panne ou en fin de vie pour les stations suivantes :
- BORG (Bory, Sommet)
- GPSG (Grande Pente Sud, Grande Pente)

S'ajoutent des interventions à distances pour le redémarrage ou un ajustement de la configuration des récepteurs, ainsi que le démontage temporaire de GBSG qui se situait sur la trajectoire de la coulée de juillet 2023.

Il reste 5 récepteurs Topcon GB-1000 obsolètes à remplacer. A noter que certains récepteurs Trimble NetR9 sont vieillissants (firmware et constellations) et seront remplacer progressivement en 2024.

Inclinométrie et extensométrie

Interventions : 58, 30.9%

Sur les 3 stations inclinométriques de forage, 1 seule est opérationnelle fin 2023 (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. Entretemps 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 remonter à la surface le capteur de BERI ont été difficiles. Peu de temps après sa remise en place, le capteur a été foudroyé et il doit désormais être remonté à nouveau pour diagnostic. Le câble de données du troisième inclinomètre est endommagé et doit être remplacé.

Plusieurs interventions à distance sur la station BORI (Bory, sommet) et DSOI (Dolomieu Sud-ouest, sommet) ont été réalisées pour relancer leur système d'acquisition. Fin 2023, plusieurs stations étaient en panne avec des acquisitions à réparer prochainement.

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 : 19, 10.1%

Plusieurs interventions à distance sur la station DSON (Dolomieu Sud-ouest, sommet), BLEN (Piton Bleu, Plaine des Cafres) et PARN (Piton Partage, hors Enclos) pour une relance du système d'acquisition.

Remplacement de l'anémomètre sur les stations BLEN (Piton Bleu, Plaine des Cafres) et PCRN (Plaine des Cafres).

GITN (Gîte, Plaine des Sables) : suite au signalement d'un défaut (non encore perturbant) par nos collègues italiens, remplacement de la carte mémoire. Ce remplacement a entraîné un dysfonctionnement (carte mémoire neuve et défectueuse ou inadaptée) jusqu'à son remplacement début janvier 2024.

Réseau Multigas : achat d'une nouvelle station, livraison à l'OVPF début 2024. Matériel non encore testé.

Réseau Novac
- Modernisation de l'infrastructure logicielle NOVAC à l'OVPF : l'extension du réseau NOVAC par l'ajout d'une station supplémentaire (CFN), demande une mise à jour du système d'exploitation du serveur pour réaliser une mise à niveau du logiciel de réception des données à l'observatoire. Ce nouveau logiciel est nécessaire pour dialoguer avec les modèles plus récents de station. La réécriture du composant logiciel produisant les données tracées dans WebObs s'est également avérée indispensable. Face à ces nombreuses difficultés, cette migration est en bonne voie mais toujours en cours début 2024.
- Future station à CFN : le nouveau matériel a été reçu début 2023, mais n'a pu être complètement testé avant la modernisation de l'infrastructure logicielle à l'OVPF. De plus, un défaut présent dès la livraison du matériel a retardé la validation de son bon fonctionnement, empêchant son installation sur le terrain lors de la mise en service de la nouvelle station CFN. A l'heure actuelle, la validation de son bon fonctionnement est toujours en attente de la mise en service de la nouvelle infrastructure logicielle.

Caméras

Interventions : 15, 8%

Démontage définitif de la caméra thermique de la station CBOH (Cratère Bory, sommet).

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 : 24, 12.7%

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.

En 2023, les interventions sur le réseau de transmission ont été faites principalement sur du matériel défectueux, des prises d'eau sur les connecteurs et des interventions logicielles à distance.

Un problème majeur est survenu sur la transmission filaire par internet à la station PRO (Providence, Saint Denis). Un équipement de type Mikrotik avec une liaison 4G a été installé début 2024.

Il n'y a pas eu d'évolution sur le réseau analogique (sismomètre une composante) dont la refonte est planifiée sur les prochaines années. Une refonte de ce réseau aura lieu dans les prochaines années suivants les financements pour passer à une transmission numérique et des sismomètres 3 composantes large bande.

La migration du matériel de transmission numérique vers des équipements plus performants (Mikrotik) continue avec pour l'année 2023 les stations CFN (Cratère Fontaine), TKR (Takamaka). Il reste 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 de diagnostic) diminuant ainsi les interventions sur site et la perte de données.

Concernant la communication des équipes de terrain entre elles et avec l'observatoire, de nouveaux relais de transmission phoniques sont en cours de tests à l'observatoire.

Infrastructure et énergie

Interventions : 12, 6.3%

Remplacement de batteries et configuration à distance des MPPT pour l'essentiel.

BASR (Piton des Basaltes) : modernisation du relais planifiée sur les prochaines années avec un nouveau groupe électrogène, de 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. Une étude sur cette rénovation d'ampleur a été réalisée pour répondre à ces besoins.

Ces travaux permettront de pérenniser ce relais qui est essentiel pour la transmission des données des stations situées sur la partie ouest du volcan.

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. Une solution pour la réfection de la piste est en cours de discussion, impliquant le Conseil départemental, la Préfecture, la Parc National de La Réunion, l'Office National des Forêts et l'OVPF.

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 matérielle et logicielle 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 watch-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 fournisseur d'accès Internet 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).

 Projet inclinomètre

Banc de calibration : il est opérationnel. Des ajustements sur le contrôle de la mesure seront réalisés en équipant le banc d'une règle linéaire supplémentaire.

Mini inclinomètre de forage : le niveau de bruit enregistré n'est pas très satisfaisant (plusieurs dizaines de microradian). Une nouvelle carte électronique a été réalisée et doit être testée pour évaluer la qualité de la numérisation des capteurs.

 Données lentes

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 sismologiques, un nouveau type d'équipement et d'architecture (OrangePi, disque SSD) a été développé et est en phase de déploiement suivant les besoins.

 GETS : Geochemical Easily Transported System

Conception d'une station géochimique avec des capteurs low-cost et facilement transportables. Ce prototype, en cours de développement, permettra d'installer des capteurs au plus proche d'un site éruptif ou sur un drone. Il sera notamment installé courant 2024 sur le lac Dziani à Mayotte afin de caractériser le bullage gazeux. Valorisation du projet GETS via la présentation d'un poster lors de l'AGU, (American Geophysical Union, Chicago, décembre 2023, cf. section 13).

 Projet DAS (cf. rapport annuel 2022 de l'OVPF pour plus de détail)

Les difficultés environnementales pour l'enfouissement de la fibre optique dans la Plaine des Sables ont nécessité l'étude, la conception et plusieurs tests pour réaliser un équipement tracté par cheval, permettant ainsi d'effectuer un sillon dans le sol. La fibre devrait être déployée en 2024.

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 de l'OVPF.

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 pour la caractérisation de l'édifice et son fonctionnement à grande profondeur. Ici aussi la perspective d'installer, à terme, une station MT dans le secteur du Flanc Est apparaît 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 72, 73 et 74).

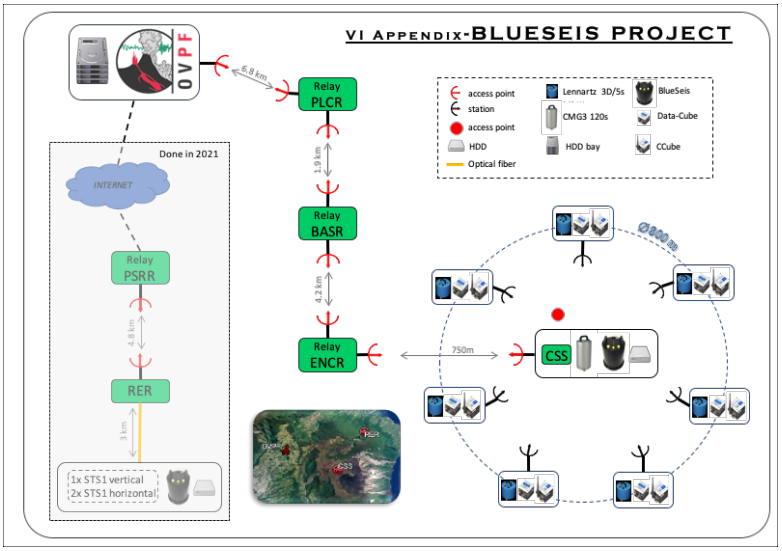

Figure 72 : Architecture des équipements installés pour le projet BlueSeis.

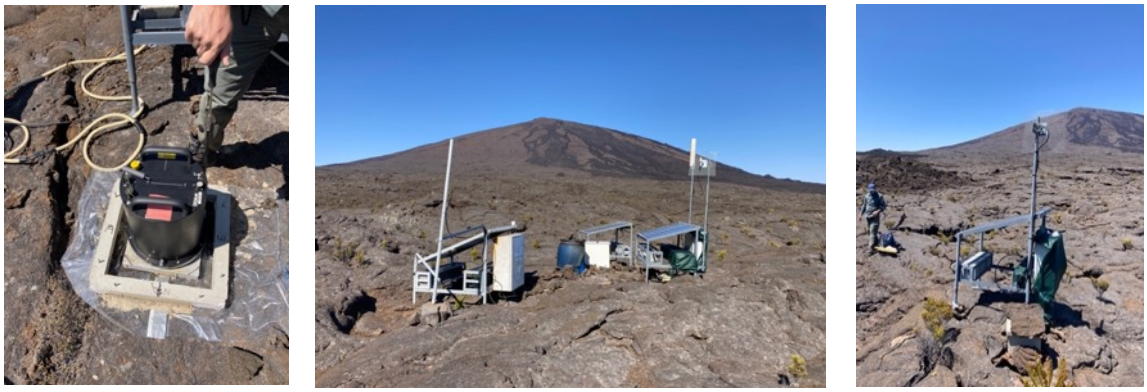

Figure 73 : Installation des équipements du projet BlueSeis. A gauche, le sismomètre rotationnel à la station CSS (Cratère Sery), au milieu l'infrastructure de la station CSS, à droite une des 7 stations sismiques constituant l'antenne sismique autour de CSS.

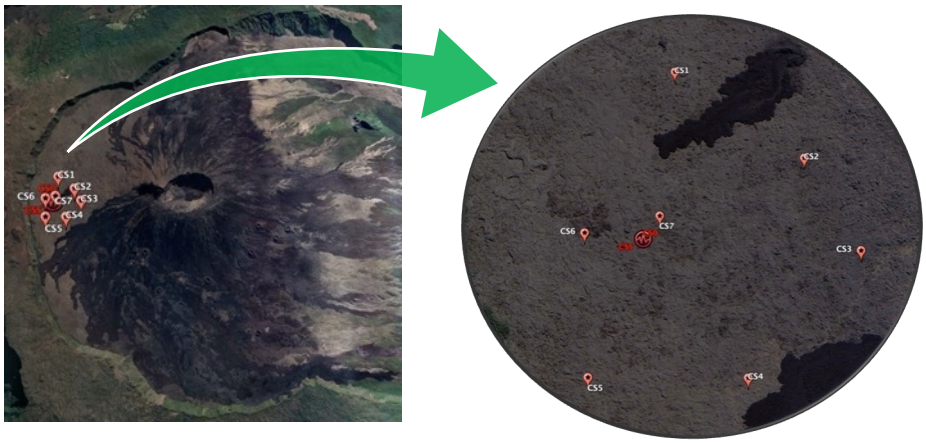

Figure 74 : Localisation des stations du projet dans l'Enclos Fouqué.

- 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 et maintenance.

- MARMOR (cf. section 11)

Dans le cadre du projet MARMOR qui prévoit l'installation d'un observatoire sous-marin au large de Mayotte, l'équipe technique de l'OVPF participe à l'étude et la conception d'un sismomètre à fibre optique auto-nivelé ne nécessitant pas d'apport l'énergie (en collaboration avec l'ESEO (École supérieure d'électronique de l'Ouest) et l'équipe de sismologie de l'IPGP). Une première étude sur la réponse instrumentale est en cours de calcul et d'expérimentation. Les plans du premier prototype modélisant le futur capteur ont été réalisés. Ce premier prototype sera fabriqué début 2024 et permettra de confronter les calculs théoriques de la réponse du capteur et les essais expérimentaux conduits avec le matériel du CEA.

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.

- Camera IRT

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

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

Dans le cadre du suivi des sursauts gammas provenant de l'espace, le SVOM a installé en 2020 deux antennes VHF sur le site de l'OVPF à 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 a été 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)

Installation en 2021 et pour quelques années d'un nouveau type de capteur sismique BlueSeis à la station 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 2024, ci-dessous les principaux axes identifiés.

Piton de la Fournaise

- Prospecter un nouveau site pour remplacer la station VIL (Cratère Villèle)
- VIL (Cratère Villèle) : Installation de la station (sismomètre).
- 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).
- 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.
- Données lentes : Données miniSEED.
- GNSS : Remplacement des récepteurs obsolètes.
- BOR (Bory) : Modernisation et renforcement de la partie énergie.
- TTR (Piton trois têtes) : Modernisation de la station avec un sismomètre 3 composantes et GNSS.
- GBNG (Grand Brûlé Nord) : Modernisation de la station avec une transmission des données en temps réel et renforcement de l'énergie.
- Inclinomètre de forage : Remettre en service le réseau.

REVOSIMA (cf. section 11 pour les actions de l'OVPF dans le cadre du REVOSIMA)
- Installation de plateforme sur le lac Dziani.
- Installation des stations sismiques sur les 3 îlots identifiés.
- Déploiement des 3 OBS communicants.

Projets
- GETS : finaliser la validation électronique et le code ; mise en place à Mayotte.
- Projet banc pour inclinomètre : mettre en œuvre la partie régulation en température du capteur et mettre en place la règle linéaire.
- 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 avec nouveau pcb.
- Projet INSU DAS dans la Plaine des Sables : installation d'une fibre de plusieurs kilomètres dans la Plaine des Sables.
- MARMOR
  - Premier prototype sismomètre optique : Validation du premier prototype.
  - Second prototype sismomètre optique : Étude et réalisation du capteur finale ; tests de validation.
  - Poste côtier : Finalisation de la collecte des besoins utilisateurs ; définition des besoins en matériel informatique.

> Réalisations informatiques

En 2023, le service informatique de l'OVPF a réalisé environ 1250 tâches comprenant les projets, les résolutions de pannes, les assistances utilisateurs, les dépannages divers, la maintenance du parc informatique, etc.

Projets

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

Le projet de refonte de l'infrastructure informatique de l'OVPF s'est poursuivi en 2023.
Des travaux ont été menés sur l'architecture réseau ainsi que sur l'infrastructure de virtualisation et de stockage.
De manière plus détaillée, le service informatique de l'OVPF a procédé à :

- La mise en place de la nouvelle architecture réseau composée de plusieurs VLANs (sous réseaux virtuels, essentiels en matière de sécurité informatique) adressés de manière privée (norme pour les réseaux dits internes).
- La mise en place sur le nouveau réseau d'un cluster de virtualisation avec la dernière version du système Proxmox Virtual Environment.
- Des échanges sur les réseaux métiers (en particulier avec M. Lecubin de l'OSU Pytheas) autour de la technologie TrueNAS (système d'exploitation du nouveau serveur de stockage). A l'issue de ces échanges, nous avons procédé à la réinstallation et à la reconfiguration complète du serveur afin de respecter les règles de l'art.

- Migration de plusieurs serveurs sur le nouveau réseau / cluster de virtualisation. Cela concerne le contrôleur de domaine, l'outil de gestion de parc informatique et technique GLPI, le wiki de l'observatoire et le nouveau serveur de stockage.
- La migration de l'ancien serveur de stockage vers le nouveau. Cette migration a été accélérée par la panne critique sur la baie de stockage nominale de l'OVPF (détaillée plus loin). A cette occasion, l'arborescence de fichiers a été repensée :
  - *DonneesFroides* : contenant toutes les données historiques (archives, données d'anciens capteurs ou réseaux obsolètes, etc.). La migration est terminée.
  - *DonneesOVPF* : contenant les données de travail pour le personnel de l'OVPF. La migration est terminée et un tri est toujours en cours. Ce dernier sera finalisé d'ici fin mars 2024.
  - *DonneesAcquisition* : contenant toutes les données générées par les capteurs sur le terrain (en temps réel et/ou différé). Une réflexion sur la restructuration de ce dépôt de données a été entamée avec l'objectif de le finaliser en 2024.

- *MARMOR*

Dans le cadre du projet MARMOR (détaillé dans la section 11), le service informatique a participé activement à deux groupes de travail :

- 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 homme-machine* » du système de commande et de supervision du réseau sous-marin câblé.
- La rédaction du cahier des charges de la conception de « *Station Fond de Mer REVOSIMA* ». Le service informatique de l'OVPF intervient sur les aspects protocoles de communication numérique et l'interopérabilité avec les systèmes d'acquisition et de traitement de données de l'OVPF/REVOSIMA.

Le service informatique a participé aux réunions hebdomadaires avec les intervenants de ces deux groupes de travail et a réalisé diverses actions tout au long de l'année :

- Des visites et repérages de locaux à Mayotte pour y installer l'infrastructure informatique de l'observatoire câblé sous-marin. L'usine de dessalement de Petite Terre et les locaux de Météo France Mayotte ont ainsi été visités.
- La veille technologique sur les systèmes de supervision et contrôle d'infrastructure de type *SCADA* (Supervisory Control and Data Acquisition).
- Une mission au Pradet dans les locaux de la société OSEAN pour effectuer la recette technique et une formation aux sismomètres de fond marin communicants Halios.

- *HATARI - OVK*

Dans le cadre du projet de recherche *HATARI - Les sources des aléas sismiques et volcaniques aux Comores* (détaillé dans la section 9), le service informatique a mené des missions de formation et de support technique. De manière plus détaillée, il a participé à :

- L'accueil de collègues de l'observatoire volcanologique du Karthala (OVK) et la présentation de l'outil de gestion de données de surveillance en observatoire WebObs.
- La formation des agents de l'OVK aux calculs de positionnement précis par satellite (PPP) et aux opérations de routine de l'OVPF.
- La formation à l'utilisation de l'outil de virtualisation UTM ainsi qu'une présentation des outils de localisation de séismes Scolv de la suite logicielle SeiscomP.
- La formation à la conversion de données de positionnement par satellite (GNSS) vers le standard RINEX pour les stations GNSS de l'OVK.
- Le dépannage des tunnels VPN pour l'accès sécurisé aux capteurs déployés au Comores dans le cadre du projet HATARI.

- L'assistance technique sur les progiciels d'acquisition et de traitement de données (Earthworm et WebObs) pour les agents de l'OVK.
- L'archivage des données à la fin du projet.

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

Le service informatique a intégré les 8 stations sismiques de ce projet de recherche (détaillé dans la section 9) dans l'infrastructure sismique et la routine de surveillance de l'OVPF.

- *Station de variations magnétiques de BORY*

La collaboration avec le LMV-OPGC-Université Clermont Auvergne a permis l'installation d'une station de variations magnétiques en test à la station BORY en 2020. Un système plus robuste a été installé en 2022. Il est basé sur une architecture matérielle BeagleBone, développé par l'observatoire magnétique national de Chambon la Forêt (IPGP).
Le projet a été finalisé en 2023 avec notamment la mise en place du rapatriement automatique des données produites par le capteur jusqu'à l'OVPF et la distribution des données vers l'observatoire de Chambon la Forêt.

Développement

Pour les besoins spécifiques des missions de l'OVPF (acquisition et traitement de données, recherche et surveillance), le service informatique est amené à concevoir, développer et maintenir des applications.

- WebObs

WebObs est un système de gestion de données de surveillance en observatoire développé à l'IPGP. 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.
Dans la terminologie 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.

Le service informatique a la charge de l'administration de WebObs (mise à jour, ajout d'utilisateur, ajout de NODE, de VIEW et de PROC). Les principales actions menées en 2023 ont été :

- La configuration d'une nouvelle PROC pour la représentation des données géochimiques de CO2.
- La centralisation de la configuration des alarmes téléphoniques de l'OVPF sur WebObs.
- Un travail de mise à jour des métadonnées des NODEs (coordonnées géographiques, etc.).
- L'ajout des codes WebObs spécifiques à l'OVPF sur le dépôt officiel GitHub du projet WebObs.

- *Système d'alarme sismique pour le REVOSIMA*

Une nouvelle alarme sismique PWTrigger (PhaseWorm Trigger) a été déployée pour détecter l'augmentation de sismicité à Mayotte. Elle est basée sur la détection automatique de séismes PhaseNet[1] intégrée au système d'acquisition et de traitement sismique Earthworm (grâce à un module nommé PhaseWorm). PWTrigger utilise deux paramètres : une fenêtre temporelle et un nombre de séismes détectés. En cas de dépassement du seuil de nombre de séismes détectés dans la fenêtre temporelle définie, la personne d'astreinte recevra un appel téléphonique avec un message audio spécifique.

[1] *Zhu, Weiqiang, and Gregory C. Beroza. "PhaseNet: A Deep-Neural-Network-Based Seismic Arrival Time Picking Method." arXiv preprint arXiv:1803.03211 (2018).*

- *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 OVS de l'IPGP.
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.

Le projet devrait être finalisé et mis en production courant 2024.

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

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

Administration système

- Mises à jour logicielles :
  - Webobs : passage de la version 2.5 à la version 2.6.
  - Progiciel de traitement et calcul GNSS *GAMIT/GLOBK* : application des mises à jour incrémentales mensuelles.
  - Progiciel de traitement et calcul GNSS *Gipsyx* : montée en version majeure de 1.7 à la 2.1.
  - Progiciel de traitement et calcul GNSS *Spectra Precision Survey Office* : montée en version majeure de 4.5 à la 5.7.

- Mises à jour du parc informatique :
  - Mise à jour des micrologiciels (ou firmwares) des équipements réseaux (routeurs, commutateurs, etc.).
  - Montée en version des systèmes d'exploitation des serveurs physiques (Proxmox VE) et virtuels (Linux Debian et Ubuntu).
  - Installation du nouvel antivirus F-Secure choisi par l'IPGP. Le parc Windows est intégralement migré. Le parc Mac OSX reste à faire courant 2024.

- Intégration ou mise à jour de nouvelles stations de mesures dans le système d'information :
  - Pour l'OVPF : les stations sismiques, météorologiques et géodésiques de Cratère Fontaine (CFN) et de Piton Takamaka (TKR).
  - Pour le REVOSIMA : les stations sismiques de Mamoudzou (BRMZ ; BRGM) et de Combani (COMB).

- Routine informatique mensuelle. Cela consiste à effectuer un suivi des mises à jour, de la maintenance préventive, la revue de la sécurité informatique, etc.

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

- Déploiements d'applications sur les postes utilisateurs ou les serveurs.

- Installation de nouveaux serveurs et postes utilisateurs :
  - Serveur *PitonMarmite* pour la refonte et la montée en version de l'acquisition des données de déformation *RADEX* (inclinométrie et extensométrie) et le logiciel d'acquisition de données géochimiques *NOVAC* (dioxyde de soufre)

  - 4 ordinateurs portables pour les chercheurs et post-doctorants de l'OVPF

- Le traitement des pannes :
  - En novembre dernier, le service informatique a géré une panne critique sur la principale baie de stockage de l'OVPF. Une nouvelle baie a été configurée, les sauvegardes ont été restaurées, les liens avec les machines virtuelles rétablis. Les acquisitions temps réel et la surveillance n'ont pas été impactées. L'interruption de service pour l'accès aux données a duré moins de 12 heures.
  - Diverses pannes logicielles et matérielles de moindre gravité.

- L'administration de WebObs :
  - Création de 5 nouveaux comptes, mise à jour de la base utilisateurs.
  - Création d'un NODE parent « infrastructure » pour chaque NODE de capteur.
  - Création de NODE pour les nouvelles stations OVPF et REVOSIMA.

- Documentation : production de documentation et mises à jour des procédures existantes, création de checklists, etc.

- Assistance aux utilisateurs et dépannage (répondre aux demandes, besoins particuliers et soucis informatiques).

- Gestion des nouveaux arrivants, des départs et du personnel en mission ayant des besoins informatiques (1 CDD, 3 doctorants, 2 départs de personnels, 7 stagiaires, 4 personnels en mission).

Administration réseau

- Tâches classiques d'administration réseau :
  - Ouverture d'accès réseaux,
  - Mises à jour de règles du pare-feu
  - Diagnostics et résolutions des pannes,
  - Entretien de la salle serveur,
  - Documentation : production de documentation et mises à jour des procédures existantes, création de checklists, etc.
  - Etc.

- Interventions pour les pannes informatiques sur les sites distants. Interventions notamment à plusieurs reprises sur le site de l'ONF à la Providence pour la station sismique PRO.

- Traitement des pannes majeures :
  - En octobre dernier, la mise à jour du routeur filtrant de l'OVPF (système pfSense) a provoqué le dysfonctionnement des tunnels VPN sur certains équipements distants (systèmes RouterOS de la société Mikrotik). Nous avons dû procéder à un rollback (retour en arrière) pour rétablir les liens réseaux.
  - La mise à jour du firmware d'un commutateur a échoué et a rendu inaccessible le réseau des serveurs. L'équipement a dû être remplacé.

Administratif

Le service informatique gère un budget annuel de 50k€ (25k€ pour l'OVPF et 25k€ pour le REVOSIMA). Il s'occupe des demandes de devis, du suivi des commandes, des relances et du service après-vente. Il gère l'inventaire (entrées et sorties) du matériel informatique.
Le service informatique fait un suivi hebdomadaire des tâches réalisées.
En complément de cette gestion administrative, un certain nombre de tâches supplémentaires incombent au service informatique :

- La préparation des plannings d'astreintes et de gardes renforcées pour l'ensemble de l'équipe.
- Le recrutement d'un contractuel pour l'année 2024 sur 9 mois.

Gestion du parc instrumental GNSS (Global Navigation Satellite Systems)

Le service informatique gère le parc instrumental de capteurs de positionnement par satellite (GNSS). Cela comprend :

- L'achat du matériel (bons de commandes, suivi des achats).
- L'inventaire des récepteurs et antennes GNSS.
- La gestion des métadonnées sur la plateforme européenne *M3G*[2].
- La configuration des récepteurs GNSS pour déploiement ou remplacement sur le terrain.
- La gestion des pannes (diagnostics, procédures de SAV, etc.).
- L'assistance pour les missions de terrains avec une composante GNSS.
- L'administration et la configuration des systèmes d'acquisition et de traitement des données (GAMIT/GLOBK, GipsyX).
- La distribution des données vers le Centre de Données de l'IPGP.
- Etc.

En 2023, un collègue de l'équipe technique a été formé à l'inventaire du matériel GNSS.

Divers

- Participation aux tâches d'observatoire :
  - Interventions sur les stations de terrain (TKR, CFN, GPN, GBNG, GITN, BLEN, RVAG, PARR).
  - Participation aux campagnes de mesure GNSS.
  - Participation aux campagnes de prélèvement (échantillonnage de gaz et de lave).
  - Participation aux astreintes de surveillance de l'activité volcanique dans le cadre de l'OVPF et du REVOSIMA.
  - Mesures absolues du champ magnétique terrestre.
  - Localisation des séismes dans le cadre du REVOSIMA.
  - Campagnes océanographiques : MayOBS24 du 29/03/2023 au 02/04/2023, MayOBS25 du 11/09/2023 au 28/09/2023.

- Construction de réseaux métiers
  - Création des rencontres trimestrielles des informaticiens gestionnaires de données en observatoire à la Réunion : *Café Péi*. Deux éditions ont eu lieu en 2023 réunissant des collègues de l'observatoire des Sciences de l'Univers de la Réunion (OSU-R), de la station de Surveillance de l'Environnement Assistée par Satellite pour l'Océan Indien (SEAS-OI) et du laboratoire Energy Lab de l'Université de La Réunion.
  - Visite de la station SEAS-OI pour un retour d'expérience dans le cadre du projet de nouvel Observatoire Volcanologique du Piton de La Fournaise.

- Conférences et formations suivies :
  - Conférence SFR not[B]hacked sur la cybersécurité.
  - Cybersécurité : le risque des menaces persistantes avancées pour les entreprises et organisations (CNRS).
  - Vers une informatique plus durable (CNRS).
  - Séminaire annuel du réseau métier national SIST des informaticiens gestionnaires de données des observatoires : *SIST23.*
  - Séminaire du réseau métier Resinfo : Café RESPIRE.
  - Formation recyclage habilitation électrique et panneaux solaires.
  - Formation à l'utilisation de capteur géochimique MicroGC.
  - Formation à la gestion des conflits et maîtrise de soi.

[2] https://gnss-metadata.eu/

  - Formation à la préparation orale d'admission - Concours ITRF.
  - Conférence de presse sur l'éruption de juillet-août 2023.

- Formations délivrées :
  - Formation à l'utilisation des équipements de communication par satellite (terminal InReach) pour les collègues de l'OVPF.
  - Maintenance des capteurs sismiques de type OBS (Ocean Bottom Seismometer).

- Interventions extérieures
  - Séminaire SIG pour le Master RNET de l'Université de La Réunion.
  - Participation avec les autres membres de l'OVPF à :
    . l'animation d'ateliers à la Cité du Volcan dans le cadre de la Fête de la science,
    . présentation dans des écoles primaires,
    . stand OVPF / REVOSIMA lors des Assises Régionales des Risques Naturels (cf. section 10).

- Mission à l'IPGP dans le cadre de groupes de travail (Projets MARMOR et AUTORINO).

- Veille technologique pour rester au courant de l'actualité informatique, des menaces en cyber sécurité, des évolutions matérielles et logicielles, etc.

L'ensemble des tâches réalisées en 2023 par le service informatique de l'OVPF s'est répartit de la manière suivante (Figures 75 et 76) :

- 48% de tâches planifiées
- 24% de tâches de demandes non planifiées
- 11% d'assistance aux utilisateurs
- 17% de gestion de pannes

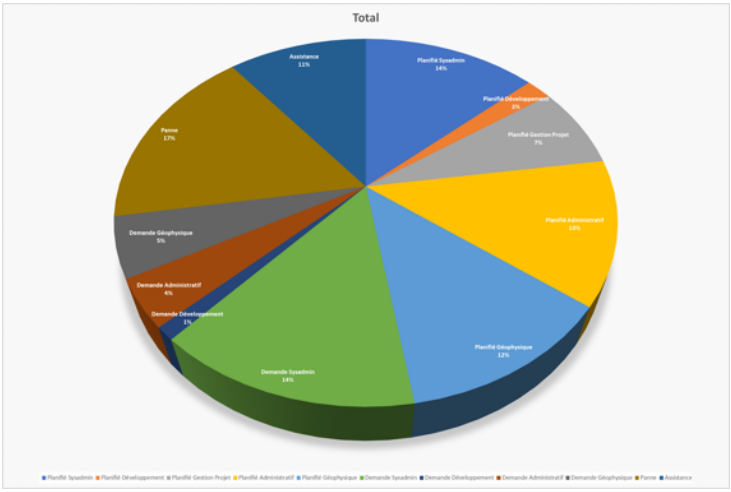

Figure 75 : Ensemble des tâches réalisées en 2023 par le service informatique de l'OVPF

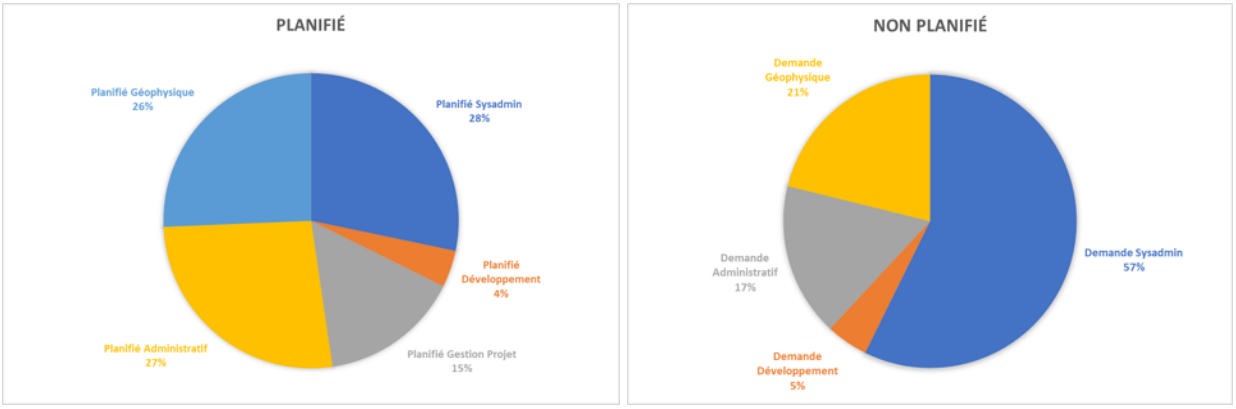

Figure 76 : Ensemble des tâches réalisées en 2023 par le service informatique de l'OVPF. A gauche : tâches planifiées. A droite : tâches non planifiées.

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 l'étude de l'influence des zones de fracture en contexte de subduction.

- ANR SOFT : Subduction des zOnes de FracTure océaniques : le rôle de l'hydratation sur la dynamique court- à long-terme des zones de subduction (début 2023-fin 2026)
Porteur du projet : Cécile Prigent (IPGP)
Laboratoires impliqués : IPGP
Montant : 299 280 euros
Lien : https://anr.fr/Projet-ANR-22-CE01-0012

Résumé du projet SOFT :
Des observations récentes sur plusieurs zones de subduction suggèrent que les zones de fractures océaniques (OFZ) ont une influence majeure sur leur dynamique : production de plus de séismes et de laves de composition distincte dans les régions où des OFZ sont en subduction. L'objectif de SOFT est de comprendre comment et pourquoi les OFZ contrôlent la dynamique sismique et tectonique des zones de subduction. L'hypothèse qui sera testée est que la différence de cycle géochimique et de comportement sismogénique où les OFZ sont subduites est due à une plus forte hydratation et/ou altération de la lithosphère océanique du fait d'une intense et profonde circulation hydrothermale au niveau des failles transformantes océaniques (OTF), la partie sismiquement active des OFZ.
SOFT se compose de 3 parties complémentaires. La composition et rhéologie de la lithosphère au niveau des OTF et OFZ sera contrainte par une étude intégrée (pétrologie-géochimie-(micro)structurale) d'échantillons crustaux et mantelliques exhumés le long d'OTF pacifique et atlantique (de 0 à ~30 km de profondeur). L'impact de la subduction de cette lithosphère hydratée sur la dynamique tectonique et le cycle géochimique des zones de subduction sera déterminé par des modèles géodynamiques 2D et 3D qui incluent réactions métamorphiques et fluides. Le rôle des OFZ sur la dynamique sismique sera établie par (1) l'analyse de mégaséismes historiques pour estimer leur impact sur la nucléation/propagation des ruptures cosismiques et (2) la caractérisation des variations latérales de sismicité le long des Petites Antilles où des OFZ sont subduites afin d'évaluer leur influence sur la quantité, distribution, évolution 4D et caractéristiques de la sismicité produite.
En intégrant ces résultats interdisciplinaires, SOFT permettra de contraindre l'impact respectif de l'hydratation de la lithosphère océanique et des réactions de déshydratation sur la dynamique sismique et tectonique des zones de subduction.

> Projets européens

L'IPGP, et notamment l'OVPF, est impliqué dans trois projets européens qui se sont poursuivis en 2023 :

. **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.

. Un projet interreg : Hatari Les sources des aléas sismiques et volcaniques aux Comores (2021-2023)
Porteur du projet : Andrea Di Muro (OVPF-IPGP, maintenant à l'OSU de Lyon) jusqu'en août 2022 puis Aline Peltier (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 2024

- Étude de la variabilité des styles éruptifs du Karthala (Thèse F. Lötter) et étude de l'activité éruptive récente du volcan de la Grille.
- Dans le cadre de ce projet, 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 77). Après l'installation incomplète de deux stations en 2022, l'ensemble des stations a pu être installé en 2023 malgré les difficultés (stabilisation de l'énergie à l'OVK, accès extérieur via internet et réalisation des dalles pour les stations).

Différents travaux ont aussi pu être réalisés dans le cadre de missions aux Comores ou à distance depuis l'OVPF :

Les actions sur le terrain

- Mise en place de deux caméras et d'un sismomètre au sommet du Karthala (station S1K). Mise en place de l'acquisition des images et de leurs sauvegardes sur les serveurs de l'OVK.

- Remise en route du réseau de télécommunication de Bahani vers le sommet du Karthala en vue de continuer le déploiement des stations sommitales
- Déploiement des nouvelles solutions de communication wifi secourue en 4G sur les stations périphériques.
- Finalisation de la station CAB : réalisation du captage suivants les plans et installation in situ.

Figure 77 : Station CO_2 sécurisée et installée au sommet du Karthala. Cette station est également pourvue d'une infrastructure pour accueillir les panneaux solaires.

Les actions à l'observatoire

- Finalisation de la sécurisation en énergie et réarrangement électrique pour plus de sécurité du matériel et des personnes, interconnexion de la nouvelle ferme solaire.
- Montage, mise en place et configuration de la baie informatique (baie de sauvegarde et baie réseau) et des systèmes de d'alimentation secourue, en mettant l'accent sur la redondance et la robustesse des systèmes et la haute disponibilité.
- Installation de l'acquisition (machine virtuelle dédiée pour le traitement des données CO2)
- Installation de l'acquisition (machine virtuelle dédiée pour le traitement des données GNSS)
- Refonte totale de l'architecture réseau du CNRDS/OVK : portail captif, réseau OVK, réseau de mesure et gestion des utilisateurs.
- Mise en place d'outils de supervision des réseaux et du contrôle de leurs bonnes utilisations.
- Mise en routine des rapatriements des données des stations et de leurs valorisations (affichages).
- Travaux sur le développement d'une solution d'affichage des données en temps réel sur les écrans de l'observatoire et à terme au musée.

- Formation (15 jours) 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 et GNSS.

- Assistances et de conseils techniques de l'OVPF auprès des agents du CNDRS/OVK tout au long de l'année.

- Restitution des résultats du projet lors d'une conférence de clôture du projet entre le 5 et le 12 juillet 2023 en Grande Comore en présence notamment des autorités comoriennes, des représentants de l'ambassade de France, de la Région Réunion, de scientifiques comoriens et français, ainsi que d'une délégation de représentants des structures muséales de la zone océan Indien (La Réunion, Maurice, Madagascar et Seychelles).

. **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.

> 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 permis 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 est prévue 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.

. **Projet ClerVolc « Measuring lava viscosity in the field »**
Porteur du projet : Oryaëlle Chevrel (OVPF/UCA/IRD)
Laboratoires impliqués : UCA, université de Buffalo, OVPF

Une collaboration autour des mesures de viscosité de la lave avec l'Université de Buffalo a été initiée en 2023 au travers une thèse encadrée par O. Chevrel (CR IRD, hébergée actuellement à l'OVPF).
Une première mission a été réalisée en Islande en juillet 2023.
https://www.youtube.com/watch?v=LQFyMA2JBPg

. **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 sont prévus d'être instrumentés en 2024 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, d'enseignement, de formation du personnel, de suivi et de 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

Avec ses 39 jours d'éruption en 2023, le Piton de la Fournaise a suscité cette année encore un vif intérêt médiatique, et de nombreuses sollicitations médiatiques pour l'OVPF avec :
- des interventions dans les médias (TV, radio et presse écrite) locaux, nationaux (parmi lesquels France télévision et France inter), avec jusqu'à une dizaine 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,
- des interventions concernant l'activité volcanique en Islande (presse locale),
- 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, ou dans la presse écrite à grande audience parmi lesquelles :
. Loca'terre (Réunion La 1ère) (18 juin 2023)
. RMC Découverte : Volcans : menaces sur la France (5 octobre 2023)
. France 3 (Région Auvergne) : Chroniques d'en Haut : La Réunion, vivre sur un volcan (8 octobre 2023)
. FUTURA : Les dangers grondant sous nos pieds (novembre 2023)
. Francetvinfo : Vivre au pied d'un volcan : le Piton de la Fournaise (diffusion à partir du 14 décembre 2023)

> 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, ainsi qu'aux manifestations « Symposium volcan – Piton de la Fournaise : gestion des flux humains en période éruptive » organisée par la commune de Sainte-Rose et l'Université de La Réunion (10 juin 2023), et « Jours de feu » organisée par la commune de Sainte-Rose et l'office de tourisme de l'Est (1-3 septembre 2023).

En 2023, cinq conférences grand public ont ainsi été animées par des membres de l'OVPF (Figure 78) :
. 25/03/2023 (Cité du Volcan) – *Au chevet des volcans* – Aline Peltier (OVPF)
. 13/05/2023 (Cité du Volcan) – *La simulation des éruptions volcaniques* – Oryaëlle Chevrel (OVPF – IRD)
. 10/06/2023 (Sainte Rose) – *Le Rôle de l'OVPF dans le Dispositif ORSEC « volcan Piton de la Fournaise »* – Aline Peltier (OVPF)
. 27/07/2023 (Cité du Volcan – Conférence de presse – *L'éruption du 2 juillet 2023* – Aline Peltier (OVPF)
. 02/09/2023 (Jours de Feu) – *Compte Rendu de la saison volcanique 2023* – Philippe Kowalski (OVPF)

Figure 78 : Interventions de l'OVPF à la Cité du Volcan dans le cadre de ses cycles de conférences et lors de la conférence de presse du 27/7/2023 (©Cité du Volcan).

- Fête de la science (10 au 27 novembre 2023)

Dans le cadre de la Fête de la Science, les membres de l'OVPF sont intervenus pour un volume horaire de 20 heures, avec 10 interventions sur des créneaux de 2h devant des scolaires (de l'école primaire au lycée). Au programme : présentation sous forme d'atelier - dans un stand dédié à l'OVPF - et de mini-conférence - dans l'auditorium de la Cité du Volcan - du métier de volcanologue et des instruments de surveillance en volcanologie (Figure 79).

Figure 79 : Animation du stand de l'OVPF à la Cité du Volcan lors de la Fête de la Science 2023 (©OVPF et Cité du Volcan).

- Journées « Femmes et Sciences »

Les femmes de l'OVPF sont très impliquées dans la promotion et la valorisation des femmes en sciences. Ainsi en 2023, elles ont participé en tant que « marraines » à plusieurs événements centrés sur ce thème :

. 11/02/2023 – participation à l'événement « *Géosciences au féminin* » organisé par la Cité du Volcan dans le cadre de la journée internationale des femmes et filles de science (4 intervenantes de l'OVPF).
. 21/11/2023 – intervention au Collège Michel Debré à La Plaine des Cafres (2 intervenantes de l'OVPF).
. 7/12/2023 – participation à l'évènement « *Elles bougent pour l'Orientation* » organisé par le lycée Ambroise Vollard de Saint Pierre pour faire connaître les métiers scientifiques et échanger avec les lycéennes (3 intervenantes de l'OVPF) (Figure 80).

Figure 80 : Participation de l'OVPF à l'événement « Elles bougent pour l'Orientation ! » au lycée Ambroise Vollard de Saint Pierre.

- Interventions auprès des scolaires

Les membres de l'OVPF sont également intervenus, sur des sollicitations ponctuelles, auprès des scolaires :

. 10/03/2023 - École Francis Rivière (Etang Salé les hauts). Intervention lors de deux sessions d'1h auprès de deux classes (CM1 et CM2). Présentation sur les volcans et le métier de volcanologue.

. 11/06/2023 – Journée annuelle de l'ANPEIP (Association Nationale Pour les Enfants Intellectuellement Précoces) de la Réunion au CREPS de Saint-Paul - Intervention lors de deux sessions d'1 heure auprès d'un public de 8 à 12 ans - Présentation sur les volcans et les métiers de la volcanologie - Atelier sismologie.

. 20/06/2023 - École Mario Hoarau de Piton Saint-Leu – Intervention lors de deux sessions d'1h30 auprès de trois classes (CM1 et CM2) - Présentation sur les volcans et les métiers de la volcanologie.

. 24/11/2023 - École La Saline les hauts (présentation à la Cité du volcan) – Intervention d'1h30 auprès de deux classes (CM1 et CM2) - Présentation sur les volcans et les métiers de la volcanologie.

. 14/12/2023 - École de Petite Ferme. Intervention d'1h30 auprès deux classes (CM1/CM2 et CE1/CE2) dans le cadre d'un projet de classe PNA (Patrimoine Nature Avenir). Présentation de l'observatoire volcanologique du Piton de la Fournaise et le métier de volcanologue.

- Interventions autres

A cela s'ajoute la participation de l'OVPF à la journée d'acculturation de la gendarmerie et aux assises régionales des risques naturels :

. 05/10/2023 – Journée d'acculturation de la gendarmerie
Le Piton de la Fournaise : les risques associés, les mesures préventives et la gestion de crise - Aline Peltier

. 12 et 13/10/2023 - Assises régionales des risques naturels
Présentation du REVOSIMA – Aline Peltier et Nicolas Zornette (BRGM)
Et animation d'un stand REVOSIMA sur les deux jours par les équipes de l'OVPF-IPGP et du BRGM.

Ainsi que la participation à la « Volcano Game Jam 2023 » (24 au 26/11/2023) :
Organisé par le Collectif Bouftang et La Cité du Volcan, l'OVPF était en 2023 le partenaire « thème » de l'événement. Les équipes participantes avaient 48h pour créer un jeu vidéo sur la thématique "Vivre sur une île avec l'aléa volcanique". Lors de cet événement deux personnels de l'OVPF étaient membres du jury d'évaluation des jeux produits. Ils ont également animé une conférence sur les volcans pour présenter le thème aux participants (Figure 81).

Figure 81 : Partenariat de l'OVPF à la Volcano Game Jam 2023.

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.

Enfin, en 2023 l'OVPF a collaboré avec le lycée professionnel François de Mahy à Saint Pierre et la Cité du Volcan dans le cadre des projets professionnels de la section Bac Pro Production Graphique RPIP (Réalisation de Produits Imprimés et Plurimédia) du lycée. Dans ce cadre, la section Bac Pro Production Graphique RPIP a réalisé un calendrier de forme atypique à destination des agents de l'OVPF et de la Cité du Volcan (Figure 82). Des photos liées à l'activité volcanique de l'île ont été fourni aux élèves qui par la suite ont su faire preuve d'inventivité et de professionnalisme pour mettre en valeur ces clichés.
Dans le cadre de cette collaboration, l'OVPF réalisera en 2024 une intervention auprès des lycéens pour présenter l'observatoire, ses missions et l'activité du Piton de la Fournaise.

Figure 82 : Calendriers réalisés par la section Bac Pro Production Graphique RPIP du lycée professionnel François de Mahy à Saint Pierre.

> Réseaux sociaux et site web

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

Les réseaux X (ex-Twitter) et Facebook de l'OVPF comptent respectivement 7271 et 34 197 abonnés (chiffres janvier 2024). Ces chiffres sont en augmentation de +544 et + 3272, respectivement pour X et Facebook par rapport à 2022.
La moyenne des portées des publications Facebook est d'environ 10 000 interactions, avec des pics à plus de 100 000 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.

> Distinctions

En 2021, Aline Peltier, directrice de l'OVPF s'est vue décerner la Médaille de la sécurité intérieure, agrafe "Administration Préfectorale", échelon bronze, pour ses actions au service de la sécurité intérieure.
Du fait de la pandémie de COVID-19, la remise de médaille n'avait pas pu se faire lors d'une cérémonie commune à tous les récipiendaires de La Réunion. Elle s'est faite en septembre 2023 par Monsieur le Préfet de La Réunion, Jérôme Filippini, en comité restreint à l'Hôtel de la Préfecture (Figure 83).
Cette distinction, qu'avait déjà reçu Nicolas Villeneuve (directeur de l'OVPF de 2013 à 2016) en 2016 et Philippe Kowalski (directeur-adjoint de l'OVPF) en 2017, montre la reconnaissance des travaux de l'observatoire pour la sécurité intérieure dans le cadre de ses missions de surveillance de l'activité volcanique du Piton de la Fournaise. Cette distinction est partagée avec tous les membres de l'OVPF dont l'action collective est centrale pour mener à bien ces missions.

Figure 83 : Remise de la Médaille de la sécurité intérieure par le Préfet de La Réunion, le 27 septembre 2023 à l'Hôtel de la Préfecture.

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 (dont 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, la surveillance opérationnelle de ce réseau est opéré par l'OVPF-IPGP. Ainsi,

- 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*;
- enfin, la direction de l'OVPF-IPGP et du BRGM de Mayotte ont un rôle de coordination à l'échelle nationale avec les scientifiques de différents instituts nationaux impliqués dans le REVOSIMA, notamment lors des réunions mensuelles du comité de suivi de la surveillance du REVOSIMA.

> 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 84 et 85).

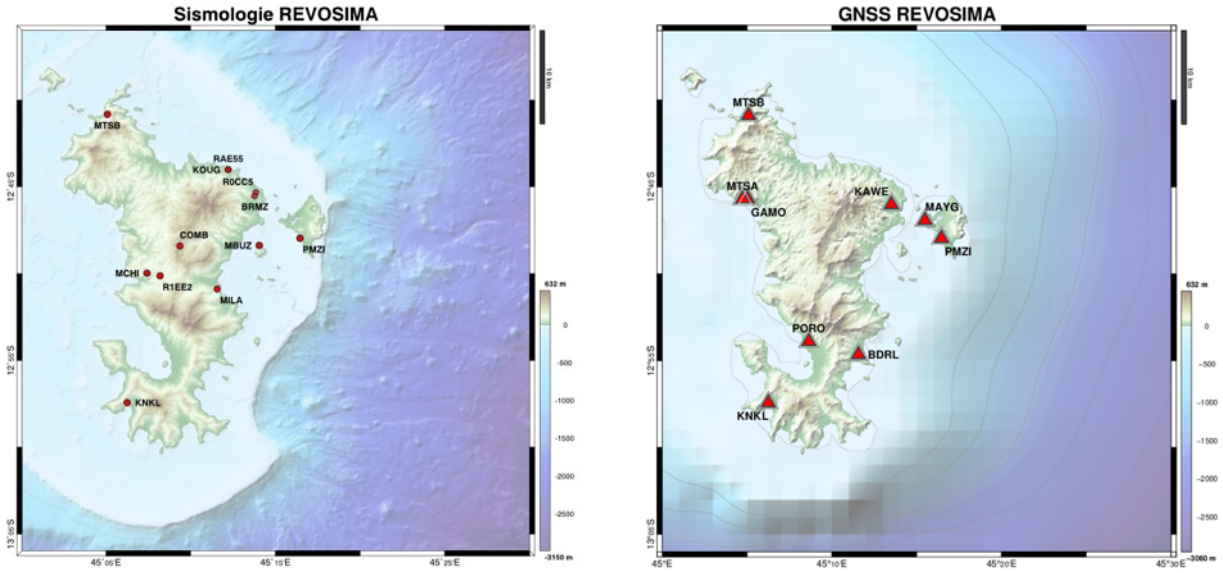

Figure 84 : Cartes de localisation (à gauche) des sismomètres et (à droite) des stations GNSS à Mayotte.

Ces réseaux comprennent pour la surveillance opérationnelle :
- 12 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 84),
- 9 stations GNSS sur Mayotte (Figure 84) et 1 à Grande Glorieuse. Ces stations sont gérées par l'OVPF et différents partenaires (EXAGONE, Précision Topo – LéL@, CNES),
- 1 station de mesure de CO_2 dans le sol (Figure 85).

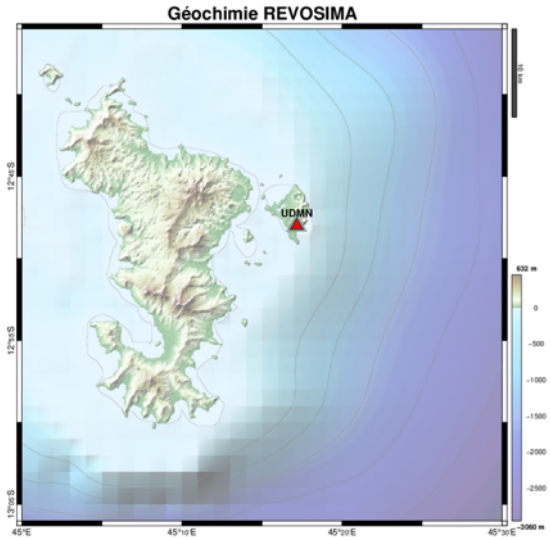

Figure 85 : Carte de localisation de la station UDMN CO_2 sol à Mayotte.

Sur toutes ces stations, 8 sont ainsi gérées par l'OVPF dans le cadre du REVOSIMA :
- COMB (Combani) : sismomètre
- 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 2023 il y a eu 26 opérations de maintenance/installation réalisées avec le concours du BRGM de Mayotte.

Réseau Petite Terre
- KNKL : modification des paramètres du récepteur GNSS, quelques coupures EDF (station hébergée à la mairie).
- KOUG : démontage de la station suite à la demande de la mairie pour cause de travaux ; date indéterminée sur la fin des travaux.
- MBUZ : capteur de température des batterie défectueux (déconnexion) et configuration du MPPT.
- MTSB : modification des paramètres du récepteur GNSS.
- UDMN : remplacement des pompes à l'identique ; prospection pour l'achat d'un nouveau type de pompe.

Réseau Grande Terre
- COMB

Installation d'une nouvelle station sismique sur la parcelle du Gîte du Mont Combani (Figure 86).

Figure 86 : Station sismique COMB (Gîte Mont Combani).

- PMZI : mise à jour du récepteur GNSS et de la Mikrotik, défaut sur l'équipement de monitoring Zlan, coupures EDF intempestives pendant les travaux au CCAS (remplacements réguliers de la batterie).
- UDMN : action corrective logicielle de la transmission Mikrotik, réglage chargeur, maintenance de la station CO_2 (pompe, filtre, électrovanne et captage).

- *GLOR (Grande Glorieuse)*
- Remplacement régulier de la carte mémoire du numériseur sismique (par le personnel TAAF sur place).
- Modernisation partielle des équipements de monitoring et de gestion de l'énergie (suppression des panneaux solaires OVPF, fourniture de l'énergie par les TAAF).

- 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 2024. 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 2024 il est prévu également les actions suivantes sur les stations :
. Installation de 3 stations sismiques sur les 3 îlots identifiés (Handrema, Mogné Amiri et M'Bouini)
. GGLO (Grande Glorieuse) remplacement de la transmission satellite par les TAAF et finalisation de l'installation des solutions de télémaintenance.

- Activité sismique en 2023

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 84). Les différents types d'activité (VT : volcano-tectonique, LP : longue période, VLP : Très longue période) sont des indicateurs de l'activité du volcan au cours du temps.

La Figure 87 représente le nombre d'événements par jour identifiés au cours de l'année 2023.

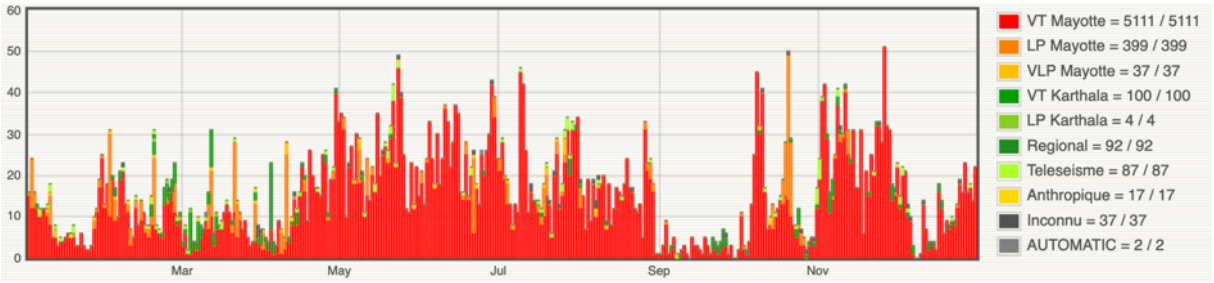

Figure 87 : Histogramme de la sismicité journalière à Mayotte en 2023.

Des fluctuations peuvent être observées mais ne sont principalement pas liées à des variations de l'activité. Ainsi, l'augmentation d'activité d'avril est liée à un changement de méthodologie. Les spectrogrammes ont été ajoutés sur les séries temporelles des stations analysées, permettant une meilleure identification des séismes et ainsi conduisant à une augmentation des séismes identifiés. La forte diminution d'activité fin août est due à la panne d'une des stations (MBUZ) du réseau sismologique qui est très utilisée pour l'identification.

La Figure 88 montre le nombre journalier d'événements localisés vus par plusieurs stations. 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 jusqu'en octobre 2023, qui a été ensuite remplacé par un agent du BRGM Orléans. Cette figure montre que la sismicité est restée assez stable tout au long de l'année, avec en moyenne en 2023, 14 VT identifiés par jour (Figure 87) et entre 2 et 3 VT localisés (Figure 88).

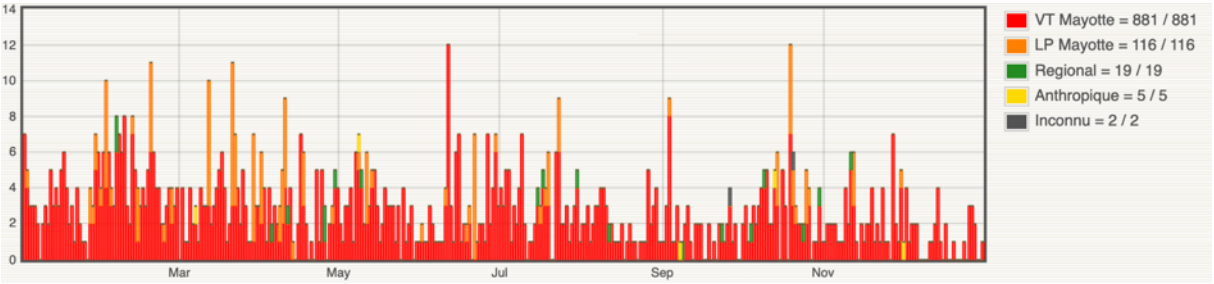

Figure 88 : Histogramme de la sismicité journalière localisée à Mayotte en 2023.

La Figure 89 représente la localisation des événements en 2023. L'activité est principalement concentrée au niveau des essaims proximal et distal à l'est de Mayotte. Les événements de faible profondeur dans cette zone ont des sources anthropiques ou sont des séismes dont la localisation n'a pas pu être effectuée correctement et devant être vérifiée grâce aux réseaux de sismomètres en mer. Une détection et relocalisation automatique de la sismicité est effectuée après les récupérations de données des sismomètres fond de mer tous les six mois.

Plusieurs séismes locaux à l'ouest et au nord de Mayotte ont également été enregistrés au cours de l'année 2023 (Figure 89).

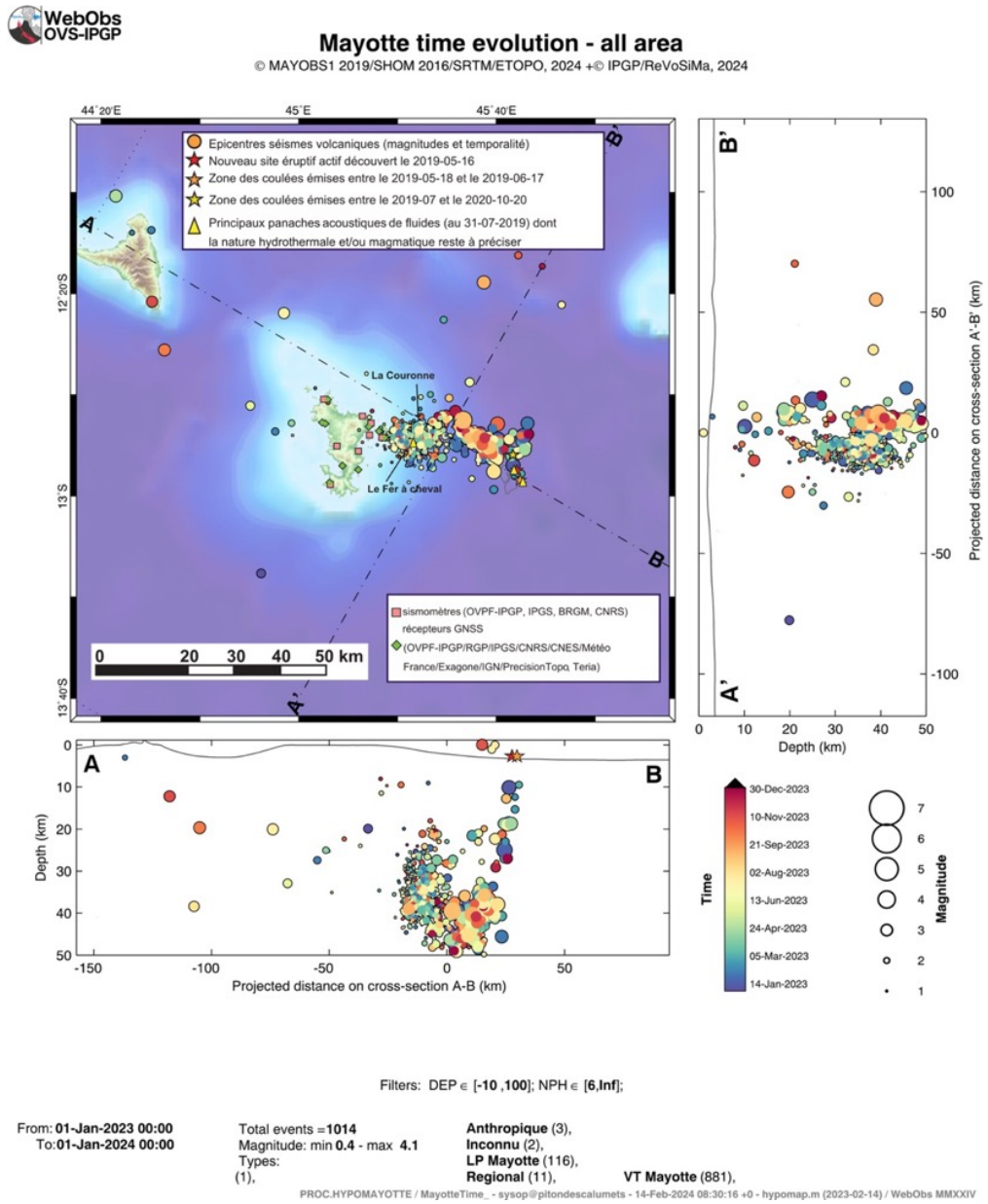

Figure 89 : Carte des épicentres (± 5 km) des séismes localisés avec les réseaux sismiques à terre (IPGP-IFREMER-CNRS-BRGM-BCSF-RéNaSS, ITES) en 2023 (échelle temporelle de couleur). Sont aussi représentées les projections des hypocentres des séismes le long de coupes transverses et axiales le long de 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, MAYOBS17 ; Rinnert et al., 2019) 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 18/01/2021. Les structures volcaniques de la zone dite de « La Couronne », du « Fer à Cheval » sont indiquées en grisé tout comme les coulées de lave de Fani Maoré. Les stations sismiques du réseau terrestre et les stations de positionnement par satellite GNSS sont indiquées par des symboles (voir légende). (©OVPF-IPGP, BRGM, IFREMER, CNRS, BCSF-RENASS, ITES / REVOSIMA).

En 2023, un séisme d'une magnitude de 4.1 a été ressenti par les habitants de l'île le 31 août 2023 à 8h10 TU (11h10 heure locale Mayotte). L'épicentre a été localisé à 30 km à l'est de Dzaoudzi.
Comme pour chaque séisme ressenti, l'OVPF, en association avec le BRGM de Mayotte, active un protocole permettant d'informer les autorités, ainsi que la population avec la diffusion d'un bulletin exceptionnel.

- Déformation en 2023

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 90). 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 GNSS. 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.

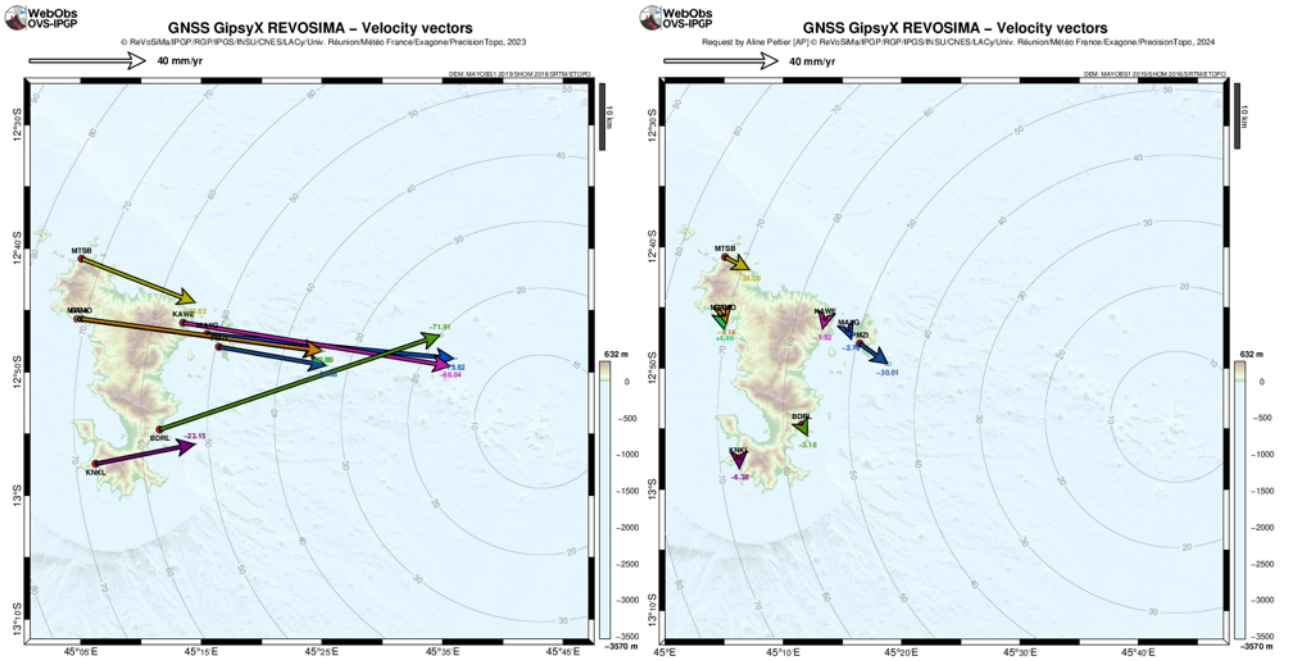

Figure 90 : Déplacements du sol enregistrés sur les stations GNSS de Mayotte entre le 1er juillet 2018 et fin 2020 (à gauche) et sur l'année 2023 (à droite). Les déplacements horizontaux sont représentés sous forme vectorielle et les déplacements verticaux sont indiqués par les valeurs chiffrées en couleur. 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 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 2023

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 quelques pannes. Depuis fin 2020, une diminution progressive et ensuite une stabilisation des émissions de CO_2 par le sol est mesurée (Figure 91). 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.

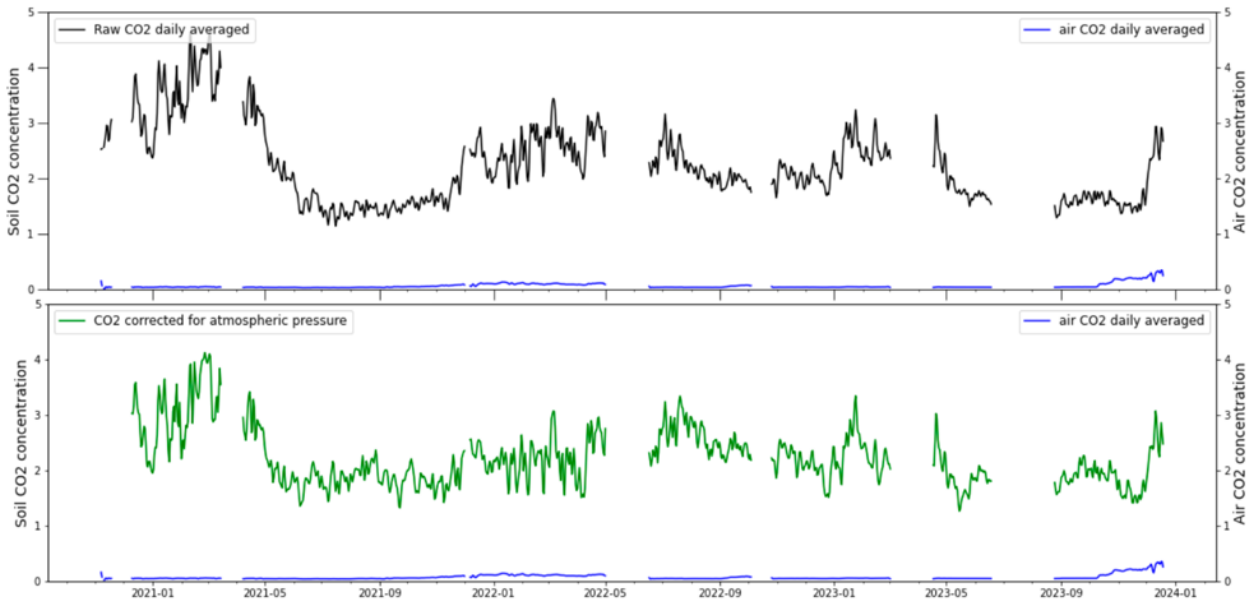

Figure 91 : Évolution annuelle des concentrations en CO_2 dans le sol (vert) et dans l'air (bleu) au niveau de la station UDMN (Petite Terre).

> Campagnes en mer

En 2023, le REVOSIMA a organisé deux campagnes en mer pour la surveillance de l'activité sismo-volcanique à Mayotte, auxquelles l'OVPF a été associé avec l'implication de personnels à bord.

- **Du 29 mars au 2 avril 2023 (MAYOBS 24) :** le patrouilleur austral des TAAF Osiris II a permis la relève, la maintenance et le redéploiement des sismomètres de fond de mer (OBS) qui renforcent le réseau sismique à terre. Deux ingénieurs d'étude de l'OVPF ont participé à cette mission.

- **Du 11 au 28 septembre 2004 (MAYOBS25),** une campagne de surveillance a été menée à bord du navire océanographique Marion Dufresne (Figure 92). Cette mission a permis, entre autres, d'assurer le suivi des émissions de fluides dans la colonne d'eau, d'identifier et localiser de nouveaux sites d'émission de fluide sur le fond-marin au niveau de la zone du Fer à cheval, d'effectuer des prélèvements (eau, roches), de récupérer les données géophysiques et de maintenir opérationnel les différents

réseaux sous-marins de surveillance et leurs capteurs. Deux ingénieurs d'étude et une chercheuse de l'OVPF ont participé à cette mission.

En parallèle des campagnes en mer, 2 personnels de l'OVPF ont participé au Pradet à la recette technique des OBS communicants (Figure 93) qui seront déployés courant 2024. Cette mission s'est déroulée de la manière suivante :

- du 26 au 28 avril 2023 : tests et qualification pour vérifier le CCTP.
- du 22 au 24 mai 2023: fin de la recette (notamment l'interface homme machine) et formation au reconditionnement et récupération des OBS.

Le personnel a aussi participé aux différentes réunions du suivi d'avancement du développement des OBS communicants tout au long de l'année.

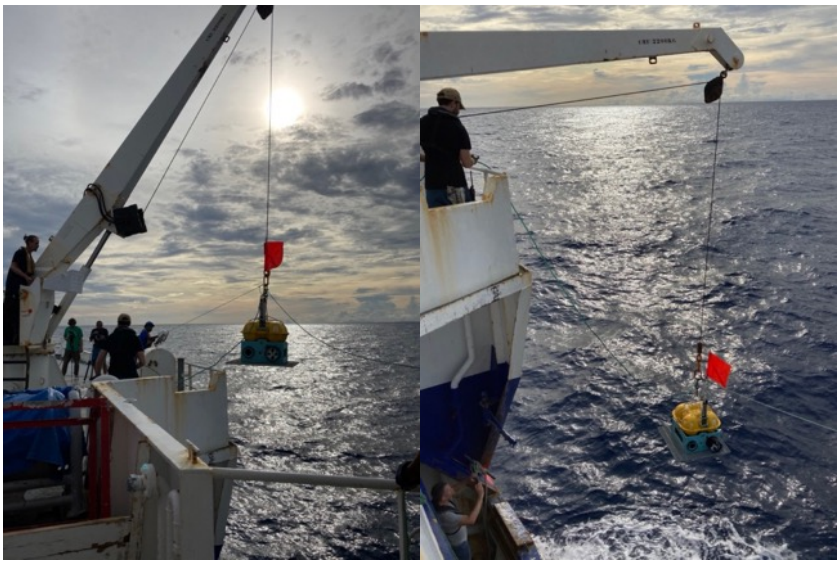

Figure 92 : Récupération d'OBS lors de la campagne MAYOBS25.

Figure 93 : Un des 3 OBS communicant qui seront déployés en 2024.

Observations majeures réalisées lors des campagnes 2023 : la campagne en mer de surveillance MAYOBS25 (du 11 au 28 septembre 2023) n'a montré aucune évolution morphologique majeure 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 2023. En revanche, un

nouveau panache acoustique a été découvert dans la zone du Fer à Cheval (Thinon et Lebas, 2023). L'analyse préliminaire des données acquises lors de MAYOBS25 a permis de valider la pérennité de l'activité d'émission de fluides sur les sites identifiés lors des campagnes précédentes (22 sites observés en juillet 2022, MAYOBS23) et le nouveau site. 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 horizontal and 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.

Thinon, I., Lebas, E. (2023) MD242 / MAYOBS25 cruise, RV Marion Dufresne, https://doi.org/10.17600/18003404

> 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 M€. 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.

L'implémentation de cet observatoire câblé est prévue de débuter en 2028 (Figure 94). 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 partie 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.

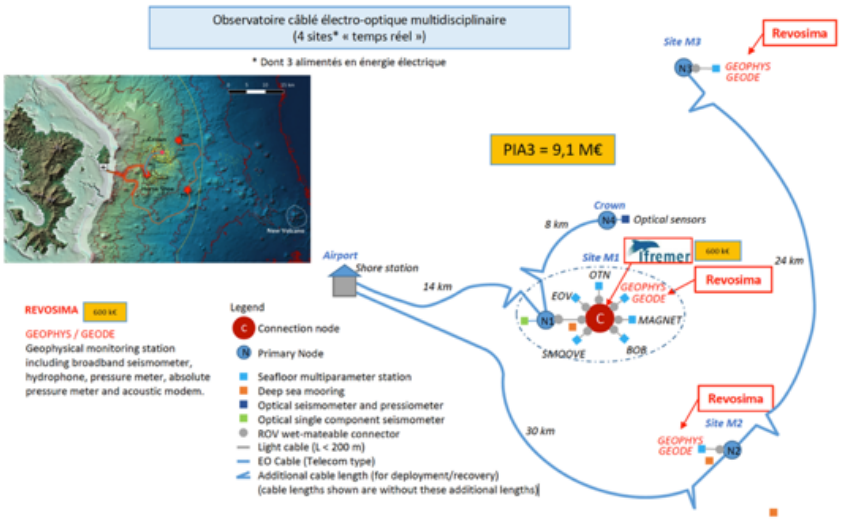

Figure 94 : MARMOR, observatoire câblé électro-optique multidisciplinaire sur 4 sites « temps réels ».

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), Tamanrasset (Algérie), et de La Réunion (Figure 95).

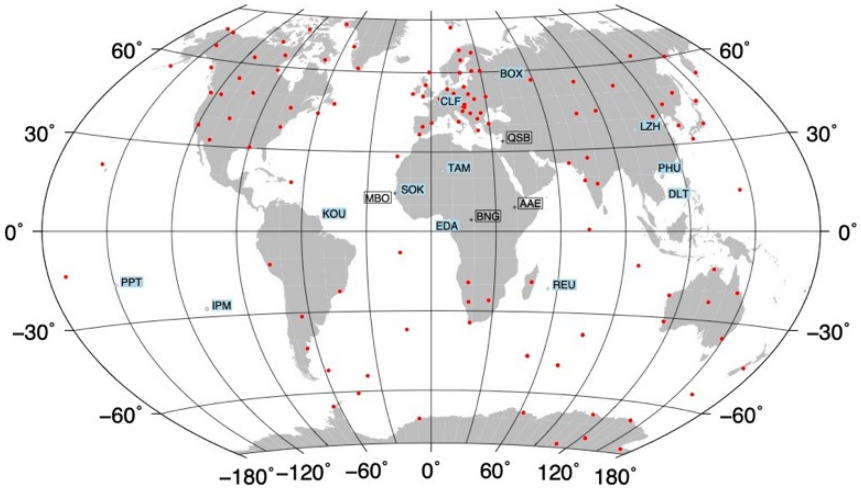

Figure 95 : Carte de localisation des observatoires magnétiques gérés par l'IPGP (en bleu). En noir : les observatoires fermés mais disposant de longues séries de donnée). En rouge : toutes les stations du réseau INTERMAGNET.

L'observatoire de La Réunion (code IAGA : REU) est opérationnel depuis novembre 2022. Il est localisé à Bourg Murat, à 500 m de l'OVPF, sur une parcelle de l'Office national des forêts.

REU, comme tout observatoire magnétique, nécessite des mesures d'étalonnage hebdomadaires par des observateurs locaux spécifiquement formés (Figure 96). Cette tâche, ainsi que la maintenance, sont assurées par l'OVPF. Quatre 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.

Figure 96 : Mesure d'étalonnage hebdomadaire réalisée par l'équipe de l'OVPF sur le site de l'observatoire magnétique REU.

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 et 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 et 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.

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 2023, les membres de l'équipe de l'OVPF ont ainsi participé à la production de 25 publications dans des revues scientifiques internationales de rangs A et B(*).

Acocella, V., M Ripepe, E. Rivalta, A. Peltier, F. Galetto, E. Joseph (2023), Towards scientific forecasting of magmatic eruption, Nat Rev Earth Environ. https://doi.org/10.1038/s43017-023-00492-z.

Bedessem, B., L. Retailleau, JM. Saurel, L. Sadeski (2023), Citizen Science for Disaster Risk Governance: Towards a Participative Seismological Monitoring of the Mayotte Volcanic Crisis, Citizen Science: Theory and Practice 8 (1).

Bénard, B., A. Di Muro, M. Liuzzo, S. Gurrieri, P. Boissier, C. Brunet et al. (2023), Seasonal environmental controls on soil CO_2 dynamics at a high CO_2 flux sites (Piton de la Fournaise and Mayotte volcanoes), Journal of Geophysical Research: Biogeosciences, 128(6), e2023JG007409.

Caballero-Leyva, E., Z. Duputel, C. Twardzik, L. Rivera, E. Klein, J. Jiang, C. Liang, L. Zhu, R. Jolivet, E. Fielding, M. Simons (2023), Revisiting the 2015 Mw=8.3 Illapel earthquake: Unveiling complex fault slip properties using Bayesian inversion, Geophys. J. Int., v. 235, pp. 2828–2845. doi:10.1093/gji/ggad380.

Chevrel, M.O., T. Latchimy, L. Batier, R. Delpoux, M. Harris, S. Kolzenburg (2023), A new portable field rotational rheometer for high-temperature melts, Review in Scientific Instrument 94, 105116 (2023) https://doi.org/10.1063/5.0160247.

Chevrel, M.O., N. Villeneuve, R. Grandin, JL. Froger, D. Coppola, F. Massimetti, A. Campus, A. Hrysiewicz, A. Peltier (2023), Report on the lava flow daily monitoring of the 19 September - 05 October 2022 eruption at Piton de la Fournaise, Volcanica 6(2), 391-404. https://doi.org/10.30909/vol.06.02.391404.

Duputel, Z., V. Ferrazzini, C. Journeau, P. Catherine, P. Kowalski, A. Peltier (2023), Tracking changes in magma transport from very-long-period seismic signals at Piton de la Fournaise volcano, Earth and Planetary Science Letters, 620, 118323, https://doi.org/10.1016/j.epsl.2023.118323.

* Duputel, Z. (2023), Chapitre 2 - Phase co-sismique : imagerie de la rupture sismique. Publié dans Le cycle sismique : de l'observation à la modélisation, ISTE Editions, London, UK. doi:10.51926/ISTE.9038.ch2.

Durand, V., A. Mangeney, P. Bernard, X. Jia, F. Bonilla, C. Satriano, JM. Saurel, E.M. Aissaoui, A. Peltier, V. Ferrazzini, P. Kowalski, F. Lauret, C. Brunet, C. Hibert (2023), Repetitive small seismicity coupled with rainfall can trigger large slope instabilities on metastable volcanic edifices, Communications Earth & Environment, 4:383, https://doi.org/10.1038/s43247-023-00996-y.

Fauria, KE., M. Jutzeler, T. Mittal, AK. Gupta, LJ. Kelly, J. Rausch, R. Bennartz, et al., (2023), Simultaneous creation of a large vapor plume and pumice raft by the 2021 Fukutoku-Oka-no-Ba shallow submarine eruption, Earth and Planetary Science Letters 609, 118076.

Flynn, ITW., MO. Chevrel, DA. Crown, MSR. Ramsey (2023), The Effects of Digital Elevation Model Resolution on the PyFLOWGO Thermorheological Lava Flow Model, Environmental Modelling & Software, Vol. 167: 105768, https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2023.105768.

Flynn, ITW., MO. Chevrel, MSR. Ramsey (2023), Adaptation of a thermorheological lava flow model for Venus conditions, Journal of Geophysical Research: Planets Vol. 128, e2022JE007710, https://doi.org/10.1029/2022JE007710.

Gailler, L., P. Labazuy, Q. Dumont, JL. Froger, A. Peltier, A. Finizola, V. Cayol, M. Chaput, E. Regis, and the SlideVolcan ERT team (2023), Volcano magnetic signal reveals rapid evolution of the inner structure of Piton de la Fournaise, Journal of Geophysical Research – Solid Earth, 128, e2022JB025290. https://doi.org/10.1029/2022JB025290.

Hamon, C., G. Pereira, MO. Chevrel, L. Aubry, C. Siebe, O. Quesada, N. Reyes (2023), Present use and production of « metates » in Turícuaro (Michoacán, Mexico): deciphering the evolution of food preparation practices, Ethnoarchaeology, https://doi.org/10.1080/19442890.2023.2280379.

Hayer, C., M. Burton, V. Ferrazzini et al. (2023), Unusually high SO2 emissions and plume height from Piton de la Fournaise volcano during the April 2020 eruption, Bull. Volcanol. 85, 21, https://doi.org/10.1007/s00445-023-01628-1.

Hoang, C., O. Magand, J. Brioude, A. Di Muro, C. Brunet, C. Ah-Peng et al. (2023), Probing the limits of sampling gaseous elemental mercury passively in the remote atmosphere, Environmental Science: Atmospheres, *3*(2), 268-281.

Journeau, C., N. Shapiro, A. Peltier, V. Ferrazzini, J. Soubestre, Z. Duputel, A. Di Muro, C. Jaupart, D. Coppola (2023), Tracking changes in the co-eruptive seismic tremor associated with magma degassing at Piton de la Fournaise volcano, Journal of Volcanology and Geothermal Research, 444,107936, https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2023.107936.

Juhel, K., Z. Duputel, L. Rivera, M. Vallée (2023), Early Source Characterization of Large Earthquakes using W-phase and Prompt Elastogravity Signals, Seismol. Res. Lett., doi:10.1785/0220230195.

Klein, E., C. Vigny, Z. Duputel, D. Zigone, L. Rivera, S. Ruiz, B. Potin (2023), Return of the Atacama deep Slow Slip Event: the 5-year recurrence confirmed by continuous GPS, Phys. Earth Planet. Int., v. 334, pp. 106970. doi:10.1016/j.pepi.2022.106970.

Lavayssière, A., L. Retailleau (2023), Capturing Mayotte's deep magmatic plumbing system and its spatiotemporal evolution with volcano-tectonic seismicity, Volcanica 6 (2), 331-344.

Moutote, L., Y. Itoh, O. Lengliné, Z. Duputel, A. Socquet (2023), Evidence of an aseismic slip continuously driving the 2017 Valparaiso earthquake sequence, J. Geophys. Res. Solid Earth, v. 128, pp. e2023JB026603. doi:10.1029/2023JB026603.

Reyes-Guzmán, N., C. Siebe, MO. Chevrel, G. Pereira, AN. Mahgoub, H. Böhnel (2023), Holocene volcanic eruptions of the malpaís de zacapu and its pre-hispanic settlement history, Ancient Mesoamerica, 1–16, https://doi.org/10.1017/S095653612100050X.

Verdurme, P., C. Lelosq, MO. Chevrel, S. Pannefieu, E. Medard, C. Berthod, JC. Komorowski, P. Bachèlery, D. Neuville, L. Gurioli L. (2023), Viscosity of silicate melts from the active submarine volcanic chain of Mayotte. Chemical Geology, Vol. 620:121326, https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2023.121326.

Villéger, S., C. Magneville, F. Roncin, L. Retailleau, T. Claverie (2023), Behavior of reef fishes during a submarine magnitude 5 earthquake, Ecology 104 (10).

Wheeler, B., M. Cannat, FJ. Fontaine, V. Chavagnac (2023), Diffuse venting and near seafloor hydrothermal circulation at the Lucky Strike vent field, Mid-Atlantic Ridge, Geochemistry, Geophysics, Geosystems, doi: 10.1029/2023GC011099.

> Congrès scientifiques nationaux et internationaux

En 2023, les membres de l'équipe de l'OVPF ont participé ou ont été associés à 30 présentations de congrès internationaux.

Albino, F., S. Gremion, V. Pinel, J-L Froger, A. Peltier, F. Beauducel (2023), Integrating GNSS local networks operated by Volcano Observatories to improve the atmospheric corrections during InSAR processing, Fringe 2023, Leeds.

Barsotti, S., S. Scollo, G. Macedonio, M. Di Vito, F. Rielo Alicia, JC. Komorowski, G. Vougioukalakis, E0 Zeeuw de-Dalfsen van, L. Ottemöller, A. HG. Pimentel, M. Coltelli, R. Carmo, R. Marques, J. Medeiros, T. Ferreira, S. Loughlin, A. Peltier (2023), Operating the Aviation Color Code system at European Volcano Observatories: experiences and challenges, IAVCEI meeting. Rotorua.

Beauducel, F., P. Boissier, J.M. Saurel, L. Dassin, P. Sakic, B. Camus, C. Griot, A.A. Fahmi, C. Brunet, É. Lajeunesse, V. Ferrazzini, A. Burtin, A. Peltier, J.B. de Chabalier, C. Berthod, A. Di Muro, P. Besson, B. Taisne (2023), WebObs : un ensemble intégré d'outils pour les observatoires, SIST23, Nantes.

Beroza, G., K. Pankow, L. Retailleau, F. Tilmann, W. Zhu (2023), Machine Learning for Real-time Monitoring, Pannel discussion, Seismological Society of America meeting.

Brauner, J., MO. Chevrel, L. Vanderkluysen, TR. Walter (2023), Lava flow hazard assessment on Bioko Island (Equatorial Guinea). IUGG General assembly Berlin.

Chevrel, MO., A. Harris, A. Peltier, N. Villeneuve, D. Coppola, S. Drenne (2023), Near real time lava flow Hazard assessment in support to eruptive crises management at Piton de la Fournaise, La Réunion, IAVCEI meeting. Rotorua.

Chevrel, MO, T. Latchimy, L. Batier, R. Delpoux, M. Harris, S. Kolzenburg, T. Parsons, I. Sonder, C. Berlie-Caillat (2023), Viscosity measurement on an active lava flow: new instruments and first tests at Litli Hrútur lava flow in Iceland, Journées CNFGG-SNOV, Clermont Ferrand.

Chevrel, MO, P. Verdurme, C. Lelosq, S. Pannefieu, E. Medard, C. Berthod, JC. Komorowski, P. Bachèlery, D. Neuville, L. Gurioli (2023), Viscosity of silicate melts from the active submarine volcanic chain of Mayotte, Abstract EGU2023- 7520, Vienna.

Chevrel, MO., T. Latchimy, S. Kolzenburg, M. Harris, I. Sonder, T. Parsons, C. Berlie-Caillat, L. Batier, R. Delpoux. Measuring the viscosity of lava using a portable rotational field rheometer, IAVCEI meeting. Rotorua.

De Sagazan, C., L. Retailleau, M. Gerbault, A. Peltier, N. Feuillet, F.J. Fontaine, W. Crawford (2023), Seismicity near Mayotte explained by interacting magma bodies: Insights from numerical modeling, GeoMod 2023, Paris.

Di Muro, A., H. Toiwilou, V. Ferrazzini, B. Smet, H. Soulé, JL. Froger, S. Poppe, B. Benard, M. Liuzzo, V. Cayol, S. Bafakih, L. Retailleau, F. Lauret, M. Cogne; C. Brunet, T. Lecoq, C. Caudron, N. D'Oreye, D. Smittarello, F. Lötter, S. Bambaouma, A. Rizzo, F. Grassa, S. Gurrieri, N. Villeneuve, A. Peltier (2023), Managing the progressive awakening of Karthala volcano (Comoros Archipelago) after 14 years of quiescence: lessons learned from a long phase (2021-2023) of unrest, Abstract EGU2023- 8962, Vienna.

Duputel, Z., E. Caballero, C. Twardzik, L. Rivera, E. Klein, J. Jiang, C. Liang, L. Zhu, R. Jolivet, E. Fielding, M. Simons (2023), Revisiting the 2015 Mw=8.3 Illapel earthquake: Unveiling complex fault slip properties using Bayesian inversion. Abstract EGU2023- 6666, Vienna.

Durand, V., A. Mangeney, P. Bernard, X. Jia, F. Bonilla, C. Satriano, JM. Saurel, M. Aissaoui El, A. Peltier, V. Ferrazzini, P. Kowalski, F. Lauret, C. Brunet, C. Hibert (2023), The competing roles of seismicity and rainfall in slope destabilization: rockfalls triggered on a metastable volcanic edifice, Abstract EGU2023- 8130, Vienna.

Farquharson J.I., MO. Chevrel, P. Delmelle, MJ. Heap, B. Kennedy, ARL. Kushnir, FB. Wadsworth, R. Williams (2023), Five years of Volcanica, Volcanic and Magmatic Studies Group meeting abstracts, 4th – 6th January 2023, London.

Flynn, I., D. Crown, M. Ramsey, MO. Chevrel (2023), Mapping and modeling venusian lava flows: implications for future missions, LPSC.

Fontaine, F.J., A. Hauck., A. Peltier (2023), The Piton de La Fournaise Hydrothermal System : A Numerical Perspective, GeoMod 2023, Paris.

Gerbault M., A. Peltier, F. Fontaine, JL. Got, R. Hassani, V. Ferrazzini, L. Gailler, Z. Duputel (2023), Seismicity below the eastern flank of Piton de la Fournaise (La Réunion) explained with elasto-plastic models of magma inflation, IAVCEI meeting. Rotorua.

Hamon, C., G. Pereira, L. Aubry, O. Chevrel, O. Quezada, N. Reyes (2023), From the volcano to the tool: a long-term history of metate production around El Metate volcano (Michoacan). Celebrating the 80th anniversary of Parícutin volcano (Michoacán, Mexico) - Preserving our heritage and preparing for future eruptions, Morelia, Mexico.

Harris, M., S. Kolzenburg, MO. Chevrel, T. Parsons, I. Sonder (2023), A new portable penetrometer for measuring the viscosity of active lava, GSA 2023 meeting.

Heumez, B., F. Pesqueira, K. Telali, JP. Rivierre, V. Lesur, A. Peltier (2023), La Reunion Island: a new magnetic observatory in the Indian Ocean, IAGA workshop, Hongrie.

Kartseva, T., N.M. Shapiro, V. Ferrazzini, Z. Duputel, A. Patonin, N. Shikhova (2023), Source parameters of shallow volcano-tectonic earthquakes at Piton de la Fournaise volcano (la Réunion, France) estimated from codas of seismograms, 2023 Fall Meeting, AGU, San Francisco.

Komorowski, JCL., L. Gurioli, C. Berthod, E. Médard, P. Verdurme, V. Puzenat, P. Bachèlery, O. Chevrel, F. Paquet, E. Lebas, E. Rinnert, N. Feuillet, Y. Fouquet, I. Thinon, C. Cathalot, S. Jorry, P. Besson, A. Le Friant, A. di Muro, T. Lacombe, C. Deplus, C. Scalabrin, A. Lemoine, D. Pierre, B. Loubrieu, P. Ferrand, S. Bermell-Fleury, M. Pitel-Roudaut, A. Gaillot, G. Jouet, A. Lavayssière, L. Retailleau, O. Foix, E. Jacques, M. Mastin, J. Escartin, S. Hidalgo, S. Nowak, P. Burckel, C. Le Losq, J-M. Augustin, A. Lemarchand, J-M. Saurel, A. Peltier, C. Mucig, and the REVOSIMA consortium (2023), The submarine monogenetic volcanic field East of Mayotte (France, Indian Ocean): an exceptional diversity of effusive and explosive processes revealed by recurrent multidisciplinary oceanographic campaigns between 2019 and 2022, IAVCEI meeting. Rotorua.

Moutote, L., Y. Itoh, O. Lengliné, Z. Duputel, A. Socquet (2023), Evidence of an aseismic slip event continuously driving the 2017 Valparaiso earthquake sequence. Abstract EGU2023- 6581, Vienna.

Nougaret, M., C. Lelosq, L. Retailleau, A. Peltier (2023), Leveraging multivariate geophysical and geochemical time series for monitoring volcanic systems: can we use machine learning, Abstract V51C-0071, 2023 Fall Meeting, AGU, San Francisco.

Peltier, A. (2023), État des lieux de l'activité du Piton de la Fournaise, Journées CNFGG-SNOV, Clermont Ferrand.

Pischiutta, M., R. Puglia, V. Ferrazzini, M. Savage, Z. Duputel, C. Journeau, A. Di Muro, A. Peltier (2023), Temporal variations of ambient noise polarization on Piton de La Fournaise (La Réunion, France) and on Volcano island (Italy), IAVCEI meeting. Rotorua.

Ramírez-Uribe I, C. Siebe, MO. Chevrel, S. Salinas, CT. Fisher, MN. Guilbaud, P. Layer (2023), Geological and archaeological aspects of Rancho Seco and Mazcuta monogenetic volcanoes (Michoacán, Mexico) - Preserving our heritage and preparing for future eruptions, Morelia, Mexico.

Verdurme, P., MO. Chevrel, L. Gurioli, E. Medard, C. Berthod, JC. Komorowski, P. Bachèlery (2023), Vesicle Morphologies of Popping Rocks: Implication for degassing processes during the 2018-2021 Mayotte submarine eruption, Journées CNFGG-SNOV, Clermont Ferrand.

Verdurme, P., MO. Chevrel, L. Gurioli, E. Medard, C. Berthod, JC. Komorowski, P. Bachèlery (2023), Vesicle Morphologies of Popping Rocks: Implication for degassing processes during the 2018-2021 Mayotte submarine eruption, Abstract EGU2023- 5594, Vienna.

Vesely, N. I., E.P. Eibl, V. Ferrazzini, J. Wassermann (2023), Comparison of a rotational sensor and an array on Piton de la Fournaise volcano, La Réunion, Abstract EGU2023- 6025, Vienna.