



I PRESENTATION DE L'OBSERVATOIRE	4
1 PREAMBULE	4
2 BUDGET	5
3 REMERCIEMENTS	6
II PERSONNEL OVPF ET ACCUEIL D'ETUDIANTS - MISSIONNAIRES	7
1 SITUATION DU PERSONNEL	7
2 ACCUEIL DE STAGIAIRES, DOCTORANTS ET MISSIONNAIRES	9
III RESUME DE L'ACTIVITE DU PITON DE LA FOURNAISE EN 2021	10
IV SISMICITE	15
1 LE RESEAU SISMOLOGIQUE DE L'OVPF	15
2 ACTIVITE SISMIQUE EN 2021	16
3 VALIDATION DU CATALOGUE SISMIQUE DU CENTRE DE DONNEES DE L'IPGP	23
V GEODESIE	24
1 LES RESEAUX DE SURVEILLANCE DE LA DEFORMATION DE L'OVPF	24
2 OBSERVATION DES DEFORMATIONS EN 2021	27
VI GEOCHIMIE	37
1 SURVEILLANCE DES EMISSIONS GAZEUSES DU MASSIF DU PITON DE LA FOURNAISE	37
2 ÉMISSIONS DE SO ₂ (RESEAU DOAS « NOVAC »)	38
3 MESURES MULTIGAS	43
4 ÉMISSIONS DE CO ₂ PAR LE SOL	45
5 CARACTERISATION ET SUIVI DES EMISSIONS GAZEUSES SUR LE MASSIF DU PITON DES NEIGES	50
6 COMPOSITION DES PRODUITS SOLIDES DES ERUPTIONS DU PITON DE LA FOURNAISE EN 2021	52
VII IMAGERIE ET TELEDETECTION	65
1 L'INSAR (INTERFEROMETRIC SYNTHETIC APERTURE RADAR)	65
2 L'OPTIQUE	68
3 LE MULTI SPECTRAL	69
VIII REALISATIONS TECHNIQUES ET INFORMATIQUES	73
1 REALISATIONS TECHNIQUES	73
2 REALISATIONS INFORMATIQUES	92
IX PROJETS AMBITIEUX AU SEIN DE L'OVPF OU EN COLLABORATION AVEC L'OVPF	97

1 PROJETS ANR	97
2 PROJETS EUROPEENS	103
3 PROJETS OMNCG OSU-REUNION	106
4 PROJETS IPGP	107
5 COLLABORATIONS INTERNATIONALES D’ECHANGES	107
X SOLLICITATIONS MEDIAS ET INTERVENTIONS GRAND PUBLIC	109
1 SOLLICITATIONS MEDIATIQUES	109
2 INTERVENTIONS GRAND PUBLIC	110
3 RESEAUX SOCIAUX ET SITE WEB	111
4 LIVRETS « HISTORIQUE DES ERUPTIONS DU PITON DE LA FOURNAISE »	112
5 VISITE OFFICIELLE	112
XI IMPLICATIONS DE L’OVPF DANS LE SUIVI DE L’ACTIVITE A MAYOTTE	113
XII PUBLICATIONS DANS DES REVUES SCIENTIFIQUES INTERNATIONALES DE RANG A	122
1 PUBLICATIONS DANS DES REVUES SCIENTIFIQUES INTERNATIONALES DE RANG A	122
2 CONGRES SCIENTIFIQUES NATIONAUX ET INTERNATIONAUX	124

I Présentation de l'observatoire



Observatoire volcanologique du Piton de la Fournaise

14 RN3, km 27

97418 La Plaine des Cafres

France



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



+ 262 (0) 2 62 27 52 92 – **Fax** : +262 (0)2 62 59 12 04

1 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 (UMR 7154), établissement composante de l'Université de Paris, et qui partage la tutelle avec le CNRS de l'UAR 3454 qui abrite plusieurs services nationaux d'observation labellisés par l'INSU-CNRS.

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

Depuis décembre 1979, date de son inauguration, l'OVPF a 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 107 capteurs de surveillance sur 68 sites différents, dont les données sont accessibles et distribuées sur les sites de Volobsis, 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 connaît 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). L'IPGP opère ce réseau à

travers l'Observatoire Volcanologique du Piton de la Fournaise (OVFP-IPGP) en coresponsabilité avec le BRGM et sa direction régionale à Mayotte et en étroite association avec l'IFREMER et le CNRS. Le REVOSIMA est soutenu par un consortium scientifique qui inclut l'ITES et le RENASS-BCSF, l'IGN, l'IRD, l'ENS, l'Université de Paris, l'Université de la Réunion, l'Université Clermont Auvergne et l'OPGC, l'Université de Strasbourg, l'Université Grenoble Alpes et l'ISterre, l'Université Paul Sabatier, Toulouse et le GET-OMPlé GET-OMP, GéoAzur, le CNES, Météo France, le SHOM et les TAAF.

L'objectif de ce rapport est de présenter l'activité 2021 de l'OVPF à travers 1) l'activité 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 et 2) les actions menées au travers du REVOSIMA.

2 Budget

Le budget annuel de l'OVPF est assuré principalement par l'IPGP (via des financements MESRI et CNRS), le MTE, le CNRS, la région Réunion, le conseil départemental de la Réunion et la préfecture de la Réunion, pour un total en 2021 d'environ 1,5 millions d'euros de frais de personnel et 325 000 euros de frais de fonctionnement / investissement (Tableau 1, Figure 1). A cela s'ajoutent les dotations ponctuelles sur projets de recherche, d'environ 193 800 euros en 2021 (cf. section IX pour les détails).

En détail le budget annuel :

	Personnels permanents	Personnels non permanents	Investissement	Fonctionnement	Projets
IPGP (MESRI)	1 004 510			35 000	50 000
IPGP (CNRS)	371 250		40 000	15 000	
IPGP (MTE)			40 000	75 000	
Région Réunion			90 000		
Département Réunion	58 000				
Préfecture Réunion				30 000	
Projet EUROVOLC		32 400			
Projet Interreg		31 000			115 000
ANR					25 000
OSU-Réunion					3 8000
	Totaux frais de personnel		Totaux investissement/Fonctionnement		Totaux projet
	1 497 160		325 000		193 800

Tableau 1 : Tableau synthétisant le budget annuel de l'OVPF en 2021.

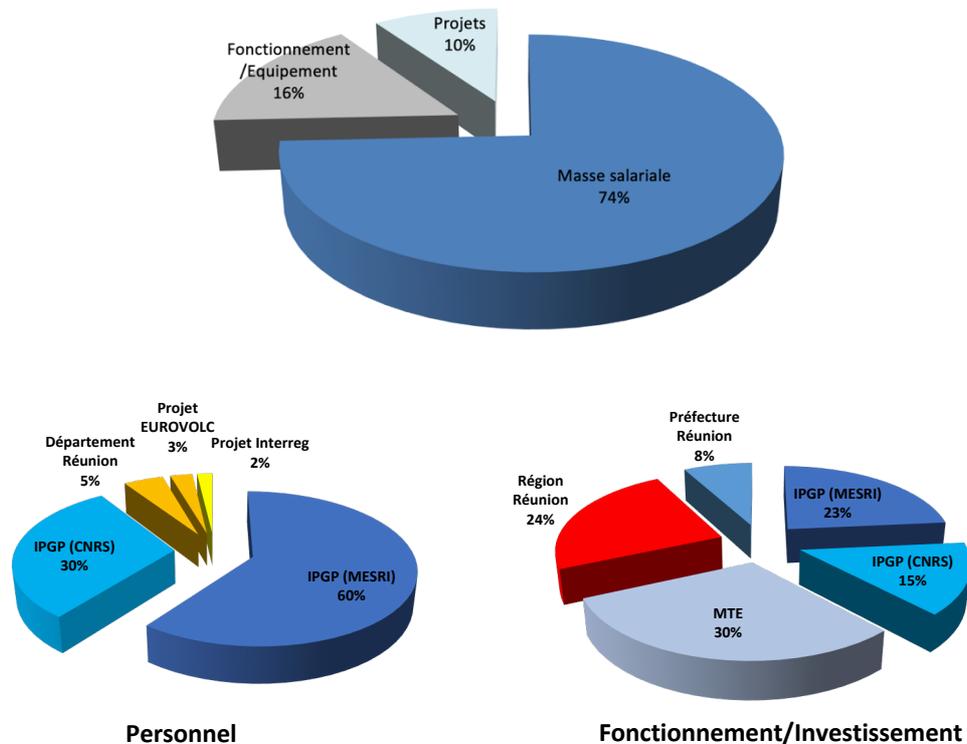


Figure 1 : (en haut) Répartition des dotations, (en bas à gauche) répartition des frais de personnel et (en bas à droite) d'investissement/fonctionnement du budget annuel de l'OVPF (moyenné sur les 3 dernières années).

3 Remerciements

Par ordre alphabétique :

Atmo-Réunion, BRGM, Cité du Volcan, CNDRS, CNES, CNRS, CNRS/INSU, CREPS, Conseil départemental de La Réunion, Collège de Cambuston, Collège de Bois d'Olive, DEAL, EDF, EDF énergies nouvelles, EMZPCOI, ENS, EOS, Gendarmerie nationale, Ifremer, IGN, INGV, IRD, IRT, ISDeform, ISTerre, ITES, LMV, Mairie du Tampon, Mairie de Sainte Rose, Mairie de Saint Philippe, Météo-France, MétéoR-OI, Musée de Villèle, ONF, OPGC, ORA, OSU-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...

II Personnel OVPF et accueil d'étudiants - missionnaires

1 Situation du personnel

Le personnel de l'observatoire constitue une équipe mixte avec des membres rattachés à divers organismes (Centre National des Astronomes et Physiciens (CNAP), CNRS, IPGP et conseil départemental) et présentant des profils de compétence variés (Figure 2).

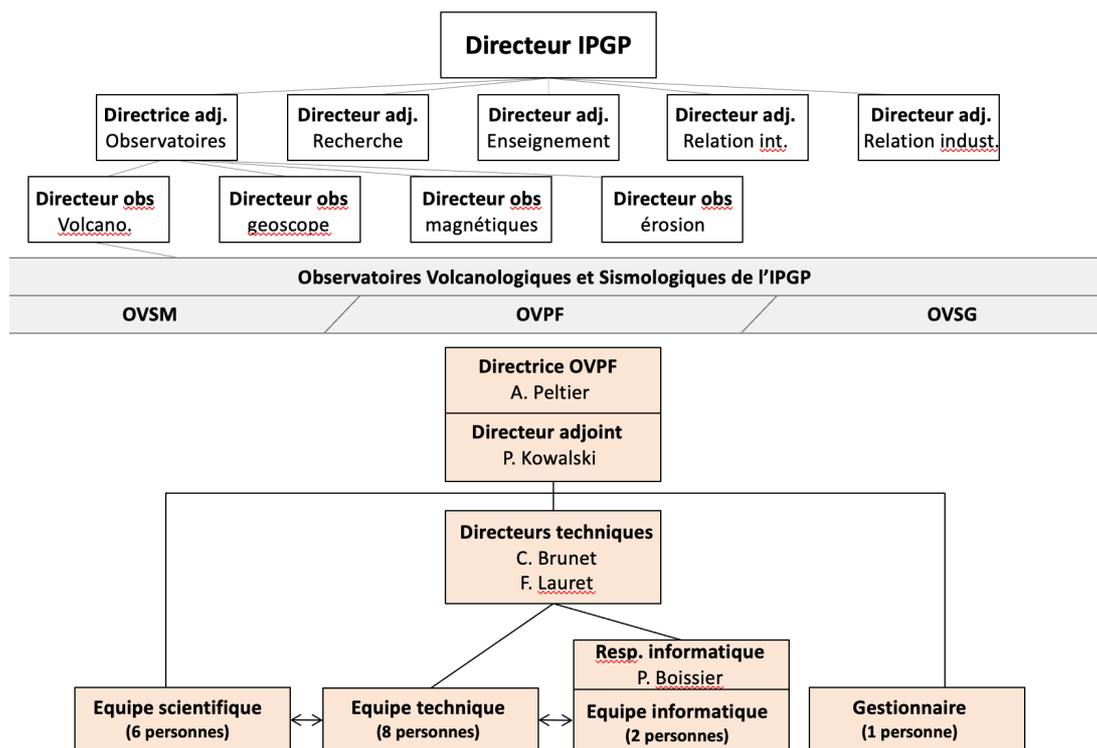


Figure 2 : Organigramme du personnel permanent de l'OVPF au 31/12/2021.

L'équipe de l'OVPF s'est consolidée cette année avec trois postes IPGP ouverts aux concours de la fonction publique dans le cadre du REVOSIMA. Ainsi les trois CDD ouverts en 2020 ont été pérennisés : un ingénieur en instrumentation, un ingénieur informaticien et un assistant ingénieur instrumentation. En complément, deux mutations d'agents CNRS (un assistant ingénieur et un chargé de recherche) depuis l'IPGP Paris et l'EOST (Strasbourg) sont venus renforcer l'équipe.

Fin 2021, le personnel était constitué de dix-sept personnes travaillant en CDI à temps complet (Figure 2) et deux CDD recrutés dans le cadre du projet Interreg Hatari (cf. section IX.2, Tableau 2). A noter également en 2021, un CDD de 6 mois qui a été financé du 22 février au 20 août 2021 sur le projet européen EUROVOLC.

A cette équipe s'ajoute Nicolas Villeneuve (Maître de conférence à l'université de la Réunion – Imagerie satellitaire et aéroportée), ancien directeur de l'OVPF, qui continue à travailler en étroite collaboration avec l'OVPF et qui partage son temps de travail entre l'université de la Réunion et l'OVPF.

Prénom NOM	Fonction
Équipe scientifique	
Bhavani Benard	CDD Post-doc Projet Hatari - Géochimie
Andrea Di Muro	Physicien CNAP/IPGP - Géochimie
Zacharie Duputel	CR CNRS - Sismologie
Valérie Ferrazzini	Physicienne-adjointe -CNAP/IPGP – Sismologie
Fabrice Fontaine	CR CNRS - Imagerie thermique / modélisation / hydrothermalisme
Aline Peltier	Physicienne CNAP/IPGP – Géophysique – <i>Directrice</i>
Lise Retailleau	Physicienne-adjointe CNAP/IPGP – Sismologie
Équipe technique	
Patrice Boissier	Ingénieur d'études IPGP – Informatique
Christophe Brunet	Ingénieur de recherche CNRS – Instrumentation – <i>Codirecteur technique</i>
Kevin Canjamalé	Ingénieur d'études IPGP CDD REVOSIMA - Instrumentation
Philippe Catherine	Ingénieur d'études IPGP – Électronique
Nicolas Desfete	Assistant ingénieur IPGP – Électricité / Câblage / Gestion Bâtiment
Cyprien Griot	Ingénieur d'études IPGP – Informatique
Philippe Hoareau	CDD technicien Projet Eurovolc - Instrumentation
Philippe Kowalski	Ingénieur de recherche CNRS – Instrumentation – <i>Directeur adjoint</i>
Frédéric Lauret	Ingénieur d'études IPGP – Electronique – <i>Codirecteur technique</i>
Jacques Lebreton	Agent de maîtrise Conseil départemental – Agent technique
Frédrick Pesquera	Assistant ingénieur IPGP – Électricité / Câblage / Gestion Bâtiment
Gestionnaires	
Luciano Garavaglia	Technicien IPGP - Gestionnaire administratif et financier
Laure Nepveu	CDD technicienne Projet Hatari - Gestionnaire administrative et financière

Tableau 2 : Personnel de l'OVPF au 31/12/2021.

2 Accueil de stagiaires, doctorants et missionnaires

En 2021, l’OVPF a accueilli en présentiel uniquement 9 stagiaires et 11 missions de chercheurs/ingénieurs (Tableaux 3 et 4). Tout comme en 2020, ce chiffre est plus bas que les années précédentes compte tenu des restrictions liées à la pandémie de covid-19, qui a favorisé le télétravail et limité les échanges avec la métropole et l’étranger.

Date début	Date fin	Nom	Encadrants	Niveau	Origine
01/09/2020	28/02/2021	Camille Bourget-Benard	F. Lauret – C. Brunet	année 3	ENSEA
05/01/2021	19/01/2021	Killian Mussard	Philippe Kowalski	L1	Université de la Réunion
29/01/2021	31/05/2021	Marella Parnas	Fabrice Fontaine	M2	Sorbonne Université
15/03/2021	29/05/2021	Michel Frangieh	Lise Retailleau	M1	IPGP
05/04/2021	11/06/2021	Yann Jobard	Patrice Boissier	année 2	IUT Réunion (DUT RT)
26/04/2021	26/08/2021	Naïm Tany	F. Lauret – C. Brunet	année 4	ESIEA
01/08/2021	30/09/2021	Andrea Garello	Lise Retailleau	M2	Université de Turin
01/08/2021	30/09/2021	Fabio Paletto	Lise Retailleau	M2	Université de Turin
02/11/2021	06/05/2021	Arthur Hauck	F.Fontaine – A.Peltier	Césure	ENS

Tableau 3 : Tableau synthétisant l’accueil de stagiaires et étudiants à l’OVPF en 2021.

Date début	Date fin	Nom	Origine
24/06/2021	18/12/2021	Cyril Journeau	ISTerre
07/07/2021	14/07/2021	Jérôme Saunier	Doris-IGN
28/09/2021	30/09/2021	Jean-Marie Saurel	IPGP
27/10/2021	15/11/2021	Martha Pischiutta	INGV
12/11/2021	02/12/2021	Lydie Gailler	LMV - UCA
12/11/2021	02/12/2021	Philippe Labazuy	LMV - UCA
12/11/2021	02/12/2021	Edouard Regis	LMV - UCA
24/11/2021	03/12/2021	Lucia Gurioli	LMV - UCA
24/11/2021	03/12/2021	Etienne Médard	LMV - UCA
24/11/2021	07/12/2021	Tristan Lacombe	LMV - UCA
06/12/2021	10/12/2021	Benoit Heumez	IPGP

Tableau 4 : Tableau synthétisant l’accueil missionnaires à l’OVPF en 2021.

III Résumé de l'activité du Piton de la Fournaise en 2021

L'année 2021 fut une fois encore particulièrement active au Piton de La Fournaise avec 2 éruptions à l'intérieur de la caldera de l'Enclos Fouqué (Figure 3), ainsi qu'une intrusion vers le flanc est qui n'a pas débouché sur une activité de surface. Au total, cette activité a représenté 54 jours d'éruption sur l'ensemble de l'année.

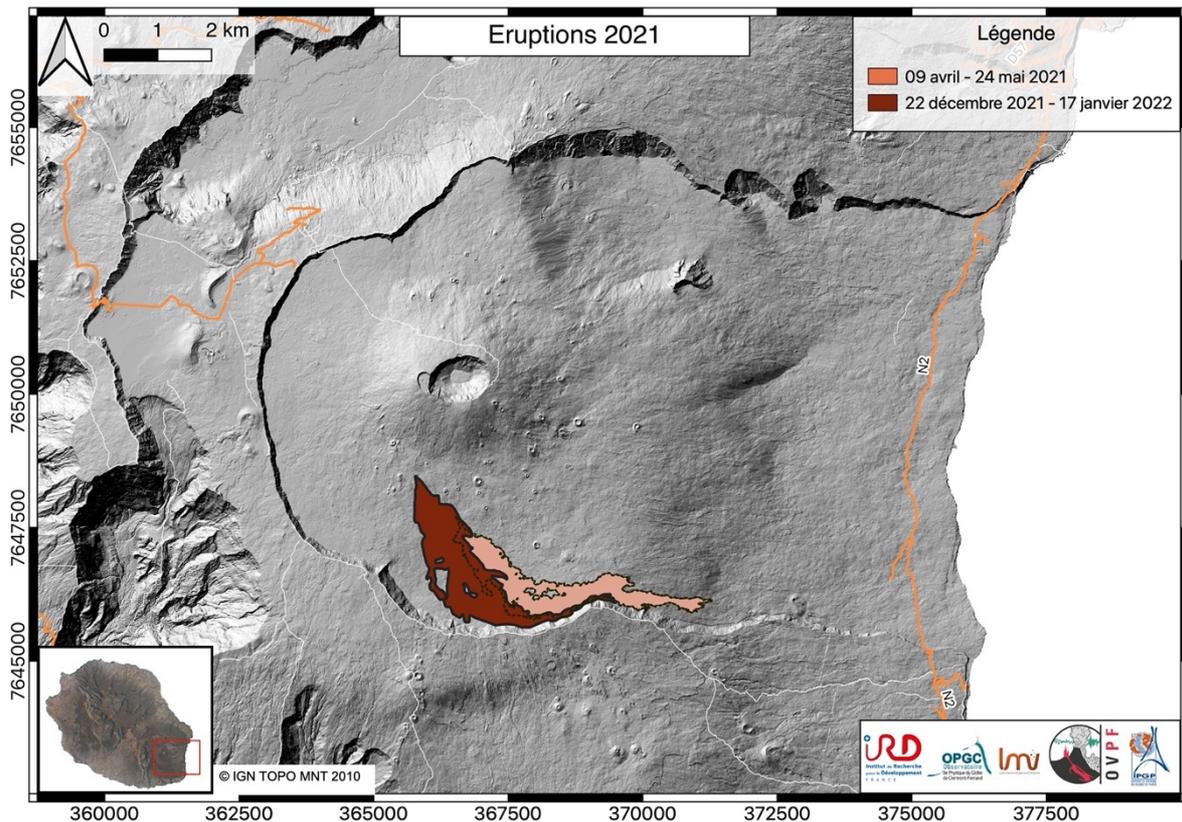


Figure 3 : Carte de localisation des coulées de lave émises en 2021 lors de l'éruption du 9 avril – 24 mai 2021 (en ocre) et de l'éruption du 22 décembre 2021 – 17 janvier 2022 (en brun).

- L'éruption du 9 avril – 24 mai 2021

La première éruption de l'année 2021 débuta le 9 avril aux alentours de 19h00 heure locale (15h00 heure T.U. ; heure T.U. = heure locale - 4h), après un peu plus de 4 heures de crise sismique et de déformation rapide du sol, témoin de la propagation finale du magma vers la surface (injection d'un dike).

Une fissure éruptive s'ouvrit sur le flanc sud du volcan à l'intérieur de la caldera de l'Enclos Fouqué, à environ 1 km au sud – sud-ouest du cratère Château Fort (Figures 3, 4).



Figure 4 : Prise de vue du site éruptif le 10 avril 2021, à 8h40 heure locale (© OVPF-IPGP).



Figure 5 : Prise de vue du site éruptif le 18 mai 2021, depuis la webcam du Piton de Bert, à 7h26 heure locale (3h26 heure T.U) (© IRT-OVPF-IPGP).

Deux cônes se sont formés (Figure 5) et sont restés actifs jusqu'à la fin de l'éruption le 24 mai 2021 (02h00 heure locale, 23 mai 22h00 heure T.U.) suite à une baisse progressive du trémor volcanique observée depuis le 2 mai. L'éruption a émis un volume total de lave en surface d'environ 13 millions de m³.

Le cône principal a été baptisé « Piton Guy Valcourt Picard » par la Cité du Volcan, le Parc National de la Réunion et l'OVPF. Ancien guide et porteur du volcan, Guy Valcourt Picard nous avait quitté à l'âge de 85 ans, un peu avant le début de cette éruption. Il était le fils d'Alfred Picard, guide emblématique du volcan qui marqua son époque dans les années 50/60 et qui forgea l'esprit des derniers guides et porteurs du Volcan dont faisait partie Guy Valcourt PICARD.

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

L'augmentation de la sismicité superficielle sous le sommet à partir de la deuxième quinzaine de novembre 2021 et l'inflation de l'édifice volcanique qui a perduré depuis l'éruption d'avril-mai 2021, furent les témoins d'une réalimentation et d'une pressurisation du réservoir magmatique superficiel par des remontées de fluides profonds. Cette réalimentation du réservoir superficiel et sa pressurisation ont conduit à l'éruption du 22 décembre à 3h30 (heure locale, 23h30 le 21 décembre T.U.) sur le flanc sud du volcan à l'intérieur de la caldera de l'Enclos Fouqué. L'activité éruptive fut caractérisée par l'ouverture de quatre fissures éruptives sur le flanc sud du volcan à l'intérieur de la caldera de l'Enclos Fouqué, à environ 550 m au sud sud-est du cratère Rivals pour la fissure la plus en amont (Figure 6). Très vite en fin de journée du 22 décembre l'activité se concentra en un seul point sur la fissure la plus en aval localisée à environ 2100 m d'altitude. Un cône éruptif se forma et un régime d'écoulement en tunnel de lave s'est mis en place en aval du cône (Figure 7).



Figure 6 : Prises de vue du site éruptif depuis la webcam du Piton de Bert en date du 22 décembre 2021 à 05h20 heure locale (01h20 TU, à gauche) et à 05h54 heure locale (01h54 TU, à droite) (©OVPF-IPGP-IRT).

L'éruption a pris fin le 17 janvier 2022 (02h10 heure locale, 22h10 heure T.U. le 16 janvier) après l'observation d'une chute brutale du trémor volcanique.

Le cône principal a été baptisé « Piton Karay » par la Cité du Volcan, le Parc National de la Réunion et l'OVPF. Le choix de ce nom a été orienté par la forme en marmite hémisphérique du cône volcanique. Lors de l'éruption, il a notamment hébergé un lac de lave débordant à plusieurs reprises des bords du cratère.

Le mot Karay désigne en créole réunionnais une marmite de forme hémisphérique (similaire à un “wok”) avec deux anses sur les côtés. En Inde, cet ustensile de cuisine est généralement appelé “karahi” (du sanskrit kaṭāha) qui fut par la suite créolisé en “caraye” (karay en graphie KWZ). Ce choix de nom permet également d’honorer la mémoire des engagés indiens, qui ont enrichi la langue réunionnaise avec des mots tels que Karay.



Figure 7 : Prise de vue du site éruptif depuis la webcam du Piton de Bert en date du 2 janvier 2022 à 6h00 heure locale (2h00 TU) (©OVPF-IPGP-IRT).

Les détails sur ces deux éruptions de 2021 sont à retrouver dans les bulletins quotidiens détaillés d’éruptions et les bulletins mensuels de l’OVPF (ISSN 2610-5101) :

<http://www.ipgp.fr/fr/ovpf/actualites-ovpf>

En plus de ces deux éruptions, une intrusion (18 octobre 2021), caractérisée par une crise sismique d’environ 24 heures et des déformations rapides de l’édifice, a eu lieu. Cette intrusion correspond à un départ de magma du réservoir superficiel mais la faible pression et/ou le faible volume impliqué n’a pas permis à cette intrusion d’arriver en surface. Elle s’est arrêté en profondeur dans le secteur de la Plaine des Osmondes.

Du côté de l’OVPF, ces 54 jours d’éruptions et cette intrusion se sont traduits par :

- 942 heures d’astreintes renforcées (se rajoutant aux astreintes H24 classiques) ; 174 de ces heures ont été assurées avec le soutien d’agents IPGP depuis Paris.

RAPPORT ANNUEL OVPF - IPGP – 2021

■ 75 communiqués exceptionnels détaillés d'activité (se rajoutant aux bulletins quotidiens semi-automatiques relatifs aux observations de la veille et aux bulletins mensuels). Ces bulletins sont consultables en ligne sur la page internet de l'OVPF (<http://www.ipgp.fr/fr/ovpf/actualites-ovpf>).

Deux de ces communiqués étaient en lien avec des séismes ressentis, l'un localisé au nord de l'île sans lien avec l'activité volcanique et l'autre localisé dans le secteur de la Plaine des Cafres.

■ 7 VONAs (Volcano Observatory Notice for Aviation) émis auprès du VAAC (Volcanic Ash Advisory Center) de Toulouse et de Londres.

■ 14 alertes en lien avec l'activité du volcan auprès de l'astreinte EMZPCOI (augmentation de sismicité, crises sismiques, début trémor éruptif, fin trémor éruptif, ...).

Ces différentes alertes auprès de l'EMZPCOI ont conduit à 9 changements de niveau d'alerte prévu dans le cadre du dispositif ORSEC « Volcan du Piton de la Fournaise », par le préfet de la Réunion :

09/04/2021 – 16h30 : Passage en Alerte 1

09/04/2021 – 19h00 : Passage en Alerte 2-2

24/05/2021 – 16h30 : Passage en Sauvegarde

03/06/2021 – 08h00 : Passage en Vigilance

18/10/2021 – 07h00 : Passage en Alerte 1

19/10/2021 – 16h00 : Passage en Sauvegarde

21/10/2021 – 05h00 : Passage en Vigilance

22/12/2021 – 03h30 : Passage en Alerte 1

22/12/2021 – 04h00 : Passage en Alerte 2-1

* A noter que le plan ORSEC « Volcan du Piton de la Fournaise » a été mis à jour le 08/11/2021 (arrêté préfectoral n°2242).

IV Sismicité

- **Collaborations nationales principales** : F. Beauducel (IPGP) ; O. Lengliné (EOST) ; O. Coutant (ISTerre) ; N. Shapiro (ISTerre) ; C. Journeau (ISTerre) ; F. Fontaine (LGSR/IPGP) ; L. Michon (LGSR/IPGP) ; M. Gerbault (OMP)
- **Collaborations internationales principales** : T. Lecoq (ROB) ; F. Massin (ETH) ; M. Pischitta (INGV)

1 Le réseau sismologique de l'OVPF

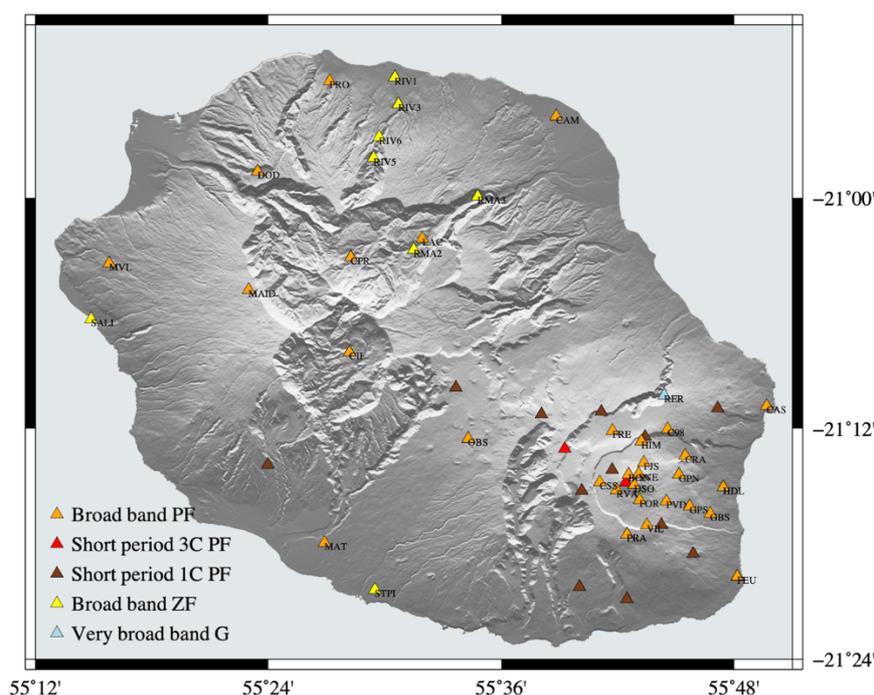


Figure 8 : Carte des réseaux sismologiques de La Réunion au 31 décembre 2021. Chaque triangle représente une station sismique équipée d'un géophone large bande (LB), d'un géophone courte période (1Hz) à 3 composantes (CP-3C), ou d'un géophone courte période (1Hz) vertical (CP-3C).

Le réseau du Piton de la Fournaise (PF) est composé de 31 stations large bande à 3 composantes, 2 stations 3 composantes courte période et 13 stations analogiques à 1 composante verticale (Figure 8) ; ce réseau intègre aussi deux stations de partenaires de l'OVPF (LAC – LGSR Université de La Réunion et MAID – Université de La Réunion) ; soit un total de 112 voies échantillonnées à 100Hz arrivant en temps réel à l'OVPF. Dans le nord de l'île, une nouvelle station a été installée à Dos d'Âne (DOD), avec pour objectif de mieux contraindre les séismes localisés sous le massif de la Roche Écrite. En collaboration avec le LGSR à l'Université de La Réunion, nous avons visité la station RIV6 du réseau temporaire (nommé ZF) dans la Rivière des Pluies avec pour objectif de pérenniser l'installation et de télémettre les données en temps réel (ce qui nécessitera la mise en place d'un relais). Cette nouvelle station est essentielle pour contraindre en temps réel la localisation et le mécanisme des séismes détectés dans le nord de l'île.

Sur le Piton de la Fournaise, un nouveau site a été repéré pour remplacer la station du Flanc Est (FLR, détruite le 5 avril 2020 par une éruption qui avait débuté 3 jours plus tôt). La station du cratère Villèle (VIL, station

évacuée et site détruit lors de l'éruption d'avril 2021) doit être réinstallée à proximité de son site initial. Les stations du piton Trois Têtes (TTR) et de Takamaka (TKR), actuellement équipés de capteurs courte période à 1 composante (Mark Product 1Hz), vont être rénovés et dotés de sismomètres large-bande.

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

2 Activité sismique en 2021

Le réseau sismologique de l'OVPF enregistre en continu l'activité sismique se produisant à la fois à l'échelle locale (sismicité sous le Piton de la Fournaise et sous l'île de La Réunion) mais également à l'échelle régionale (sismicité dans le bassin océan Indien) et mondiale (télé-séismes de forte magnitude). Nous observons également de nombreuses ondes sonores lors des orages à proximité du Piton de la Fournaise.

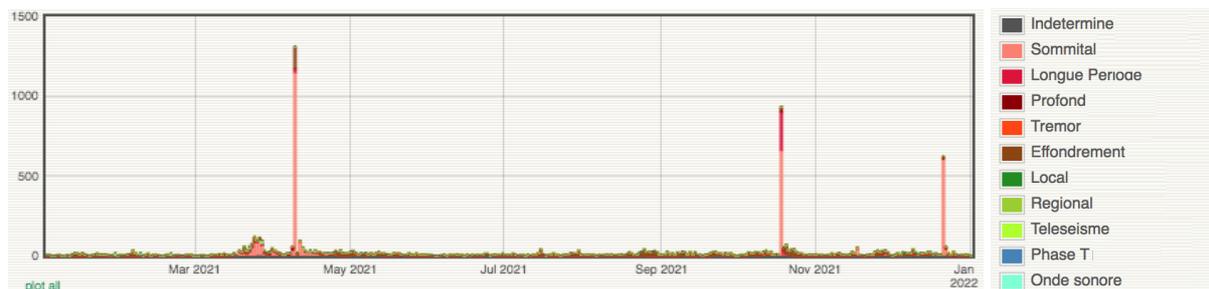


Figure 9 : Nombre de séismes par jour enregistrés dans la main courante en 2021.

Le catalogue des événements détectés et répertoriés dans la base de données de l'OVPF en 2021 (Figure 9), est nettement dominé par les séismes volcano-tectoniques dans la partie sommitale du Piton de la Fournaise, qui se produisent majoritairement lors des crises sismiques associées aux intrusions magmatiques depuis le réservoir superficiel (localisé sous le sommet au niveau de la mer ; Peltier et al., 2008).

Le dépouillement des données sismologiques ont permis la détection de :

- 4050 séismes volcano-tectoniques sommitaux
- 3073 effondrements
- 336 séismes Longue Période
- 135 séismes volcano-tectoniques profonds
- 654 séismes locaux
- 31 séismes régionaux (à moins de 2000 km de l'île)

A l'échelle régionale, les séismes présentés sur la Figure 10 proviennent en majorité de la dorsale sud-ouest indienne et de la dorsale centrale indienne. Seul 1 séisme lié à l'activité volcanique de Mayotte a été enregistré par l'OVPF contre 3 en 2020 et 42 en 2019.

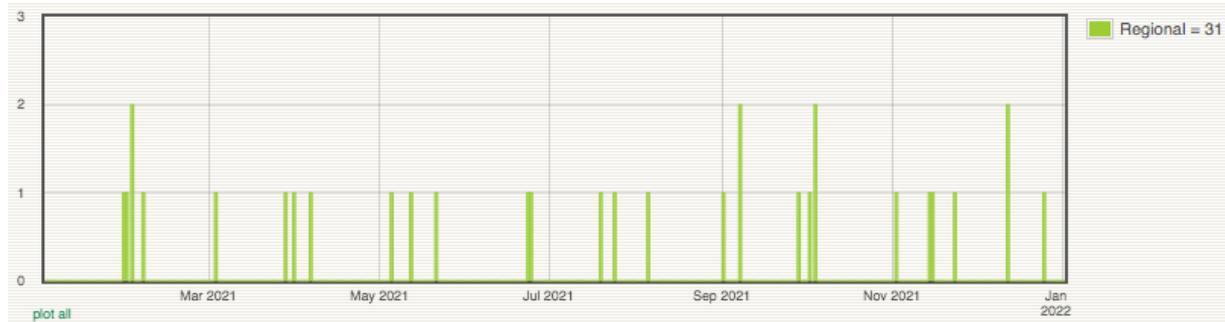


Figure 10 : Nombre de séismes régionaux par jour à La Réunion en 2021.

À l'échelle de l'île de La Réunion

A l'échelle de l'île de La Réunion, il existe 3 principales régions d'activité sismique visibles sur la Figure 11 (Duputel et al., 2021) : (1) le massif de la Roche Écrite au nord, (2) la Plaine des Cafres et la Plaine des Palmistes approximativement sur la rift-zone N120° et (3) le Piton de la Fournaise. La majorité des séismes locaux présentés sur la Figure 12 sont situés sous le massif de la Roche Écrite.

En 2021, 2 séismes ont été ressentis par la population sur l'île, de magnitude 1.8 sous le massif de la Roche Écrite le 2 Février à 05:26 UTC et le 30 Mars à 20:09 UTC sous la Plaine des Cafres. Ces séismes ont fait l'objet d'un bulletin exceptionnel de l'OVPF et d'un rapport au BCSF (<http://www.franceseisme.fr>).

La localisation des séismes à l'échelle de l'île est recalculée en utilisant les données des stations du réseau ZF dès qu'elles sont disponibles sur le site de Resif.

Suite à un projet INSU-Tellus-2020 « Sismicité sous le nord de l'île de La Réunion : origine tectonique ou processus magmatique ? », la densification du réseau de stations sismiques dans le nord a été complétée ; les stations CPR (Camp Pierrot, Salazie) et DOD (Dos d'Âne) ont pu être installées et nous espérons pouvoir pérenniser la station RIV6 (Rivière des Pluies) au cours de l'année 2022. Une doctorante qui a débuté sa thèse en janvier 2022 à l'OVPF (dans le cadre du projet ERC PRESEISMIC ; cf. section IX.1) va travailler sur la détection, la relocalisation et la détermination des mécanismes au foyer des séismes au nord de l'île en combinant les données du réseau PF (OVPF-IPGP) et celles du réseau ZF (Université de La Réunion).

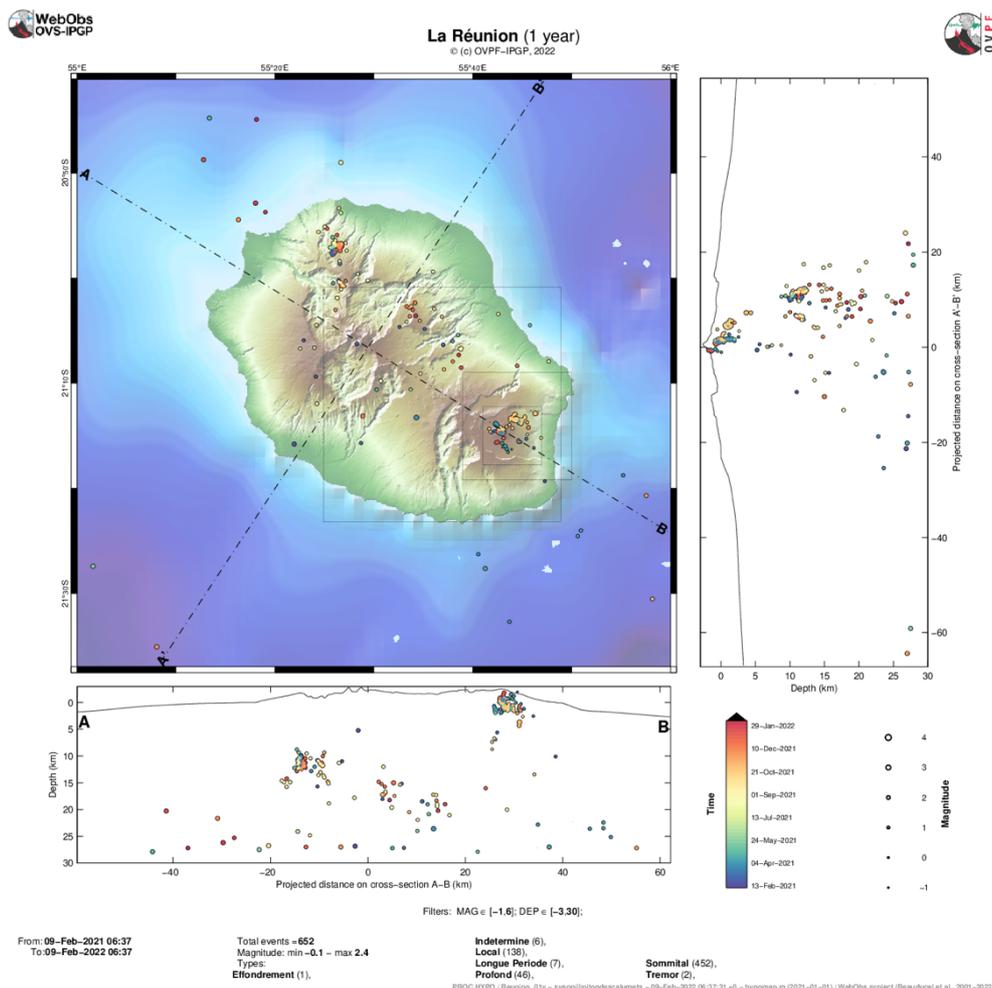


Figure 11 : Localisation des séismes au cours de l'année 2021. Chaque séisme est représenté par un cercle dont le diamètre dépend de la magnitude et la couleur dépend de la date du séisme. Le modèle de vitesse utilisé pour la localisation est un gradient de vitesse suivant la topographie. Seuls les séismes pointés manuellement sont représentés.

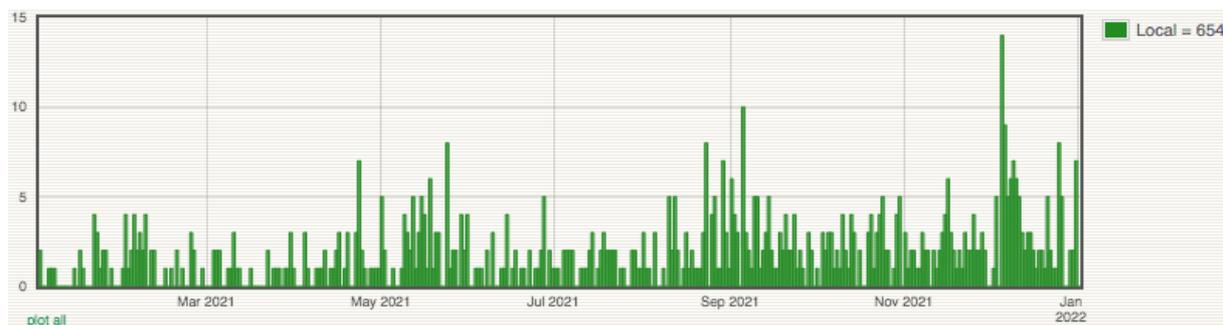


Figure 12 : Nombre de séismes locaux par jour à La Réunion en 2021.

Sismicité à l'échelle du Piton de la Fournaise :

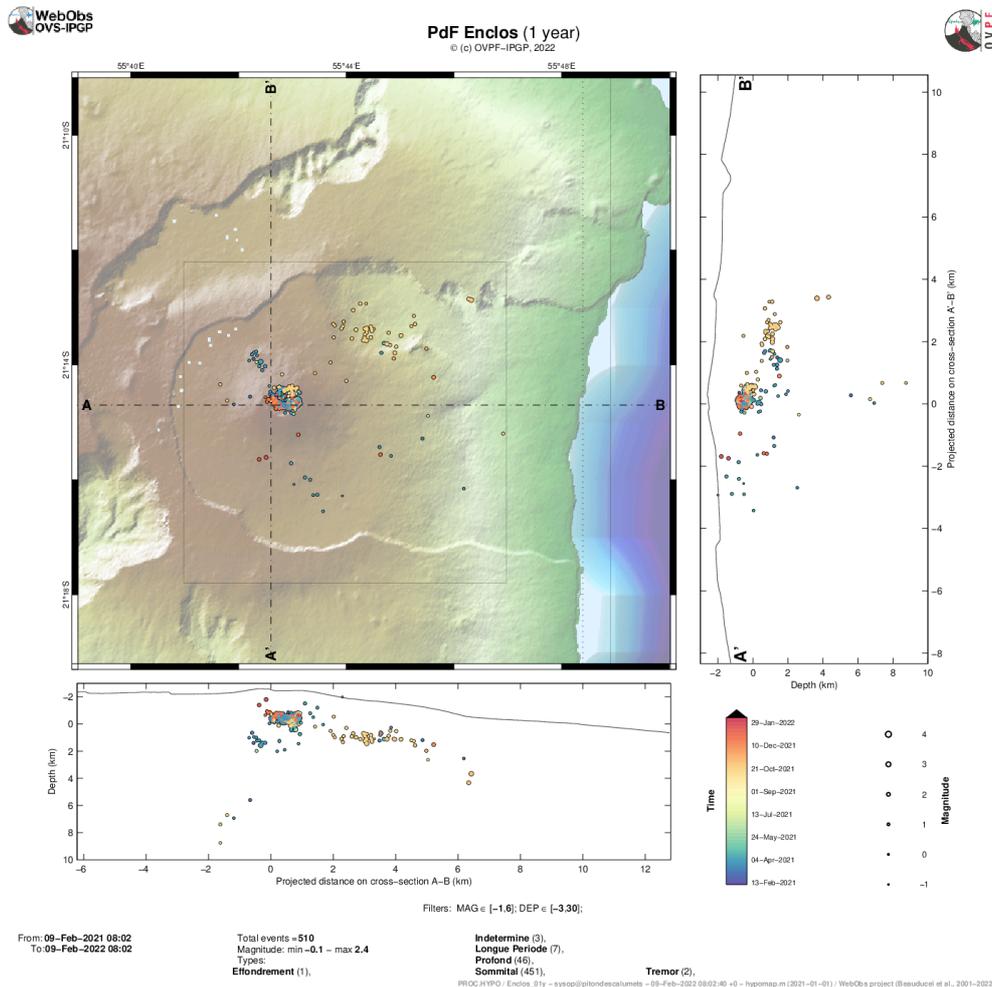


Figure 13 : Carte de localisation des séismes à l'échelle de l'Enclos Fouqué en 2021. Chaque séisme est représenté par un point dont la couleur dépend du jour de l'année. Sur cette carte sont représentés les séismes détectés et localisés manuellement par un sismologue à l'OVPF.

A l'échelle du Piton de la Fournaise, on distingue différents types de signaux sismiques associés à l'activité du volcan. On distingue tout d'abord une sismicité volcano-tectonique (VT) superficielle (au-dessus du réservoir magmatique localisé au niveau de la mer) et une sismicité VT profonde (sous le réservoir ou sous le flanc-est du volcan). La Figure 13 présente les localisations manuelles de cette sismicité VT pour l'année 2021. Lors de l'activité éruptive en surface, les signaux sont dominés par un trémor volcanique associé au dégazage du magma au niveau de la bouche éruptive. On détecte également sporadiquement des événements longue période ou très longue période lors des intrusions magmatiques ou lors des éruptions. Enfin, on observe de nombreux éboulements au sein du cratère Dolomieu, des remparts de l'enclos Fouqué, du Piton de Crac et au niveau du cassé de la Rivière de l'Est (cf. bulletins mensuels de l'OVPF en 2020 et 2021 ; ISSN 2610-5101).

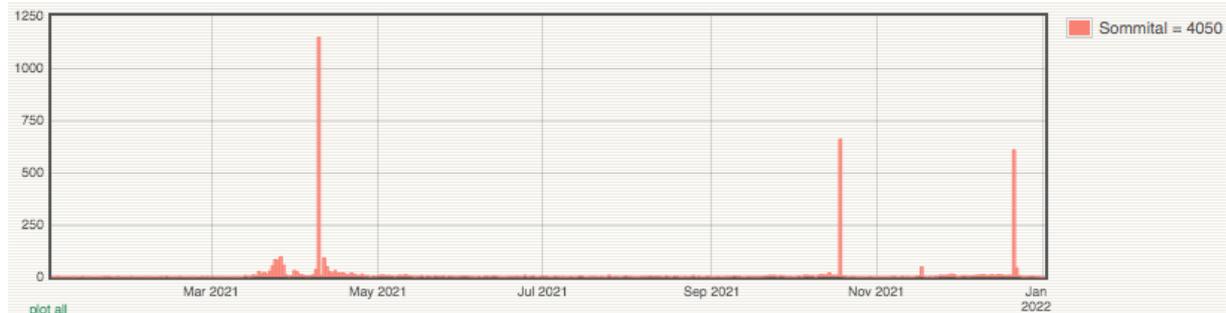


Figure 14 : Nombre de séismes sommitaux (au-dessus du niveau de la mer) par jour au Piton de la Fournaise en 2021.

Comme indiqué précédemment, les séismes VT superficiels ont essentiellement lieu au cours des crises sismiques déclenchées lors des intrusions magmatiques se propageant depuis le réservoir magmatique superficiel. En 2021, ces crises sismiques ont ainsi été observées le 9 avril, le 18 octobre et le 22 décembre (Figure 14). Une très courte crise sismique s’est également produite le 17 novembre 2021 sans avoir été accompagnée par une déformation rapide du sol (généralement observée lors des intrusions magmatiques). Cette crise peut correspondre à un début d’intrusion au niveau du réservoir superficiel (très vite avortée) ou à des déclenchements de séismes en cascade suite à la pressurisation du réservoir (i.e., sans que le magma ait quitté le réservoir). Les séismes sommitaux décrivent une structure en forme d’anneau sous le sommet avec une extension limitée en profondeur et légèrement inclinée vers l’est (Figure 13). Cette structure correspond vraisemblablement à un système de failles annulaires héritées des effondrements successifs de la caldera sommitale du Piton de la Fournaise (Michon et al., 2013 ; Duputel et al., 2019). A noter que les séismes lors de ces crises sismiques n’affectent généralement qu’une partie de cette structure annulaire et donnent une indication sur la position du potentiel futur site éruptif par rapport au cône central.

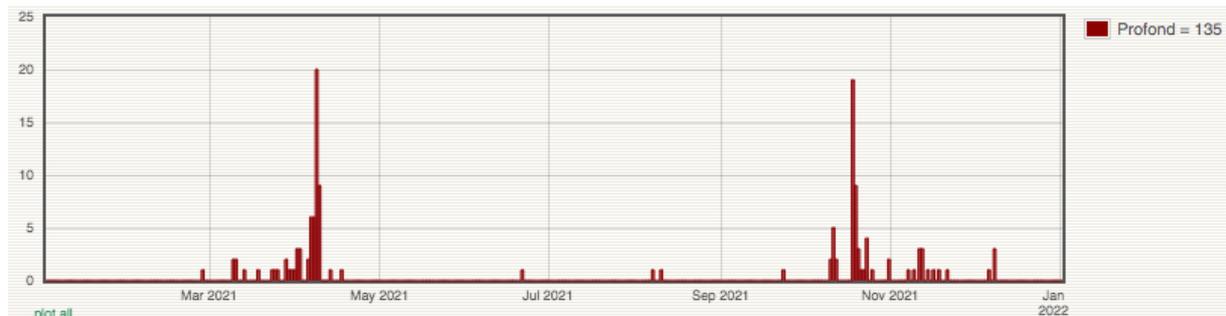


Figure 15 : Nombre de séismes profonds (sous le niveau de la mer) par jour au Piton de la Fournaise en 2021.

En 2021, les séismes profonds (i.e., sous le niveau de la mer) se sont principalement déclenchés lors de deux épisodes distincts en avril et en octobre (Figure 15). Une première phase d’activité profonde a ainsi été observée avant l’éruption du 9 avril 2021 avec ~60 séismes localisés principalement sous le flanc Nord-Est du volcan. De nombreux séismes profonds se sont également produits lors de la crise sismique du 18 octobre 2021 lors d’une intrusion magmatique avortée. Ces séismes se sont produits sous le flanc-est, au nord de la région ayant connu une crise sismique similaire en septembre 2020. Même si cette sismicité profonde semble être liée aux intrusions magmatiques distales sous le flanc-est, le lien entre le magma en migration et l’occurrence de ces séismes reste encore mal compris. Les détections automatiques par « *template matching* » (effectuées en temps quasi-réel depuis 2016; Lengliné et al., 2016) indiquent une

progression de cette sismicité de flanc vers l'est lors des intrusions successives (Figure 16). Plusieurs études sont en cours pour comprendre l'origine de cette activité sismique.

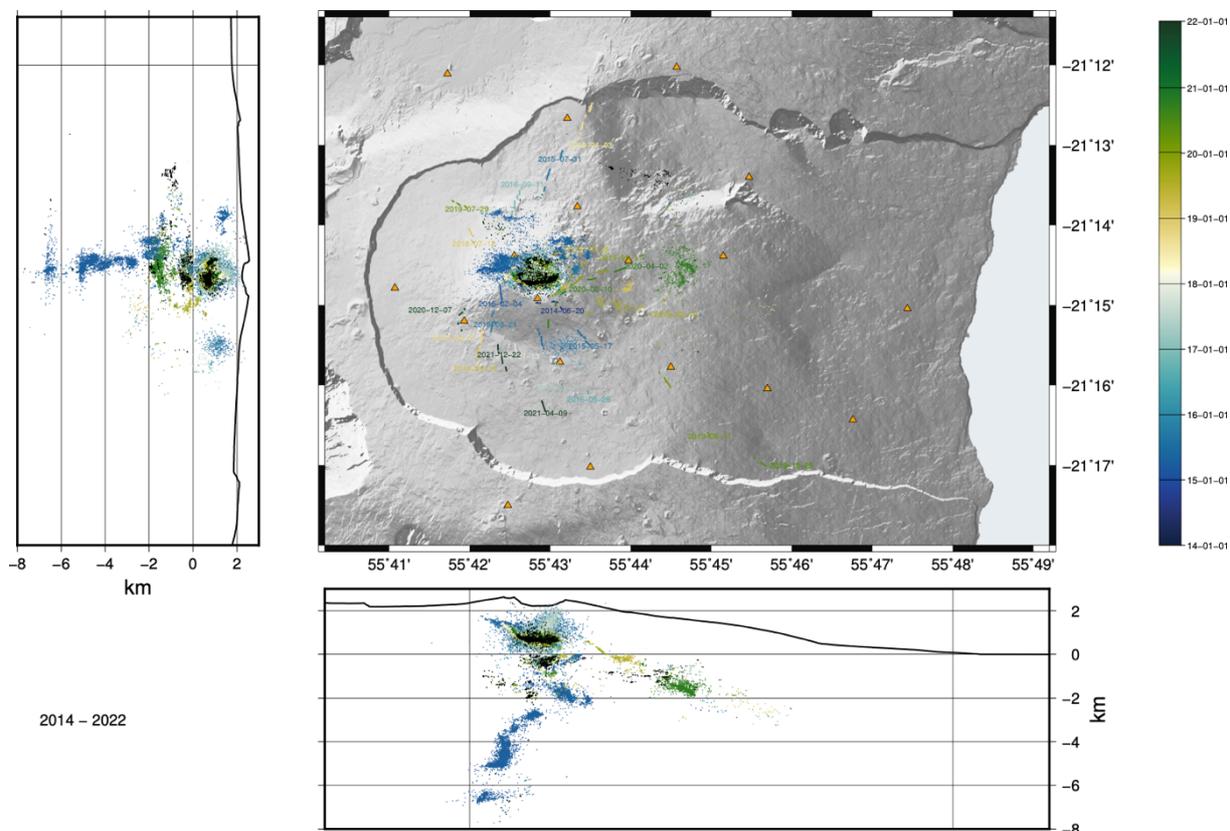


Figure 16 : Relocalisation automatique des séismes détectés par « template matching » depuis 2014. Les points indiquent la relocalisation des séismes et la couleur indique le temps origine des séismes (entre le 01/01/2014 et le 01/01/2022).

Surveillance « Jerk » (système d’alerte basé sur l’accélération des signaux de la station sismologique RER)

L’année 2021 a été marquée par 2 éruptions, le 9 avril et le 22 décembre et 1 intrusion magmatique le 18 octobre (crise sismique qui n’a pas abouti à une éruption).

La figure 17 montre les signaux « Jerk » associés à ces événements. Le « Jerk » a bien identifié les 2 éruptions. Pour l’intrusion du 18 octobre les déformations ont été trop importantes et ont généré une « alerte éruption » au lieu d’une « alerte intrusion ».

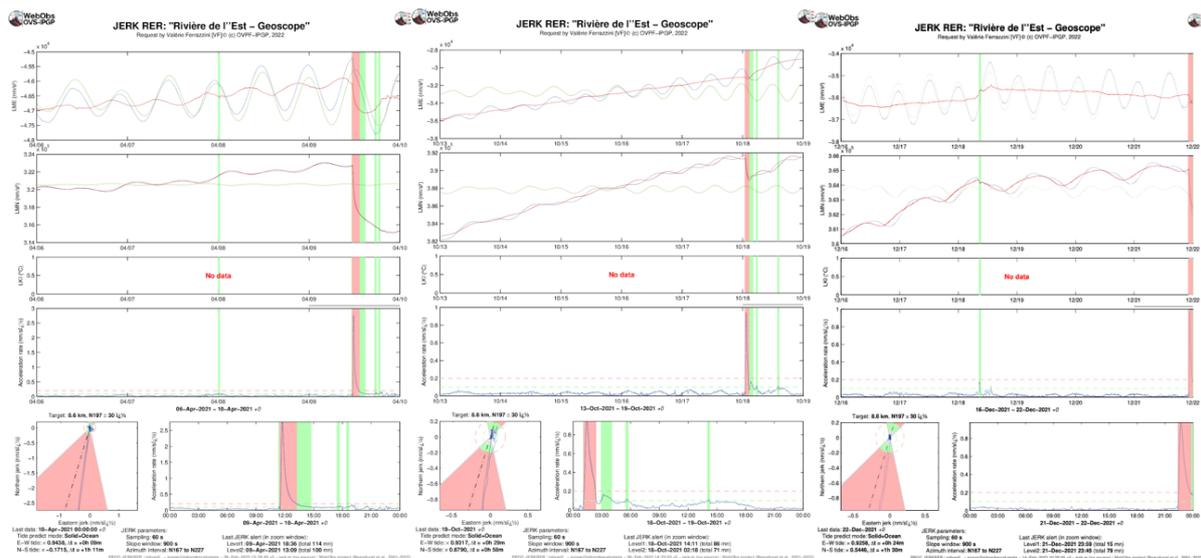


Figure 17 : Pages WebObs du «Jerk» lors de l'éruption du 9 avril 2021 (à gauche), de l'intrusion du 18 octobre 2021 (au milieu) et de l'éruption du 22 décembre à droite.

Suivi du trémor éruptif

Au cours des éruptions au Piton de la Fournaise, le suivi de l'activité en surface repose notamment sur l'observation du trémor volcanique qui est généré par le dégazage du magma au niveau de la bouche éruptive. L'enregistrement de ce trémor par différentes stations sismologiques permet ainsi une détermination rapide de la localisation du site éruptif (Figure 18 pour l'éruption du 22 Décembre 2021). L'évolution temporelle du trémor estimé par mesures RSAM (Real-time Seismic-Amplitude Measurement) est un bon indicateur de variations de l'activité en surface. Les fluctuations de l'amplitude du trémor (Figure 19) peuvent être liées à différents facteurs comme la mise en place d'un cône éruptif et de la modification de sa géométrie au cours, d'une variation du flux de lave à l'événement, ou l'apparition d'une nouvelle fissure éruptive.

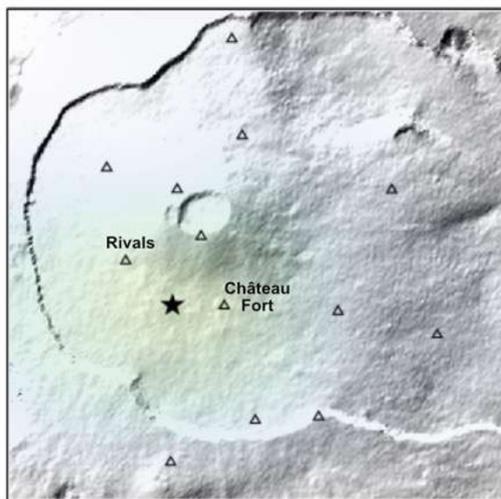


Figure 18 : Carte de trémor de l'éruption du 22 décembre 2021. Les triangles représentent la localisation des stations sismologiques et l'étoile indique la localisation correspondant au maximum d'amplitude (après interpolation entre les stations).

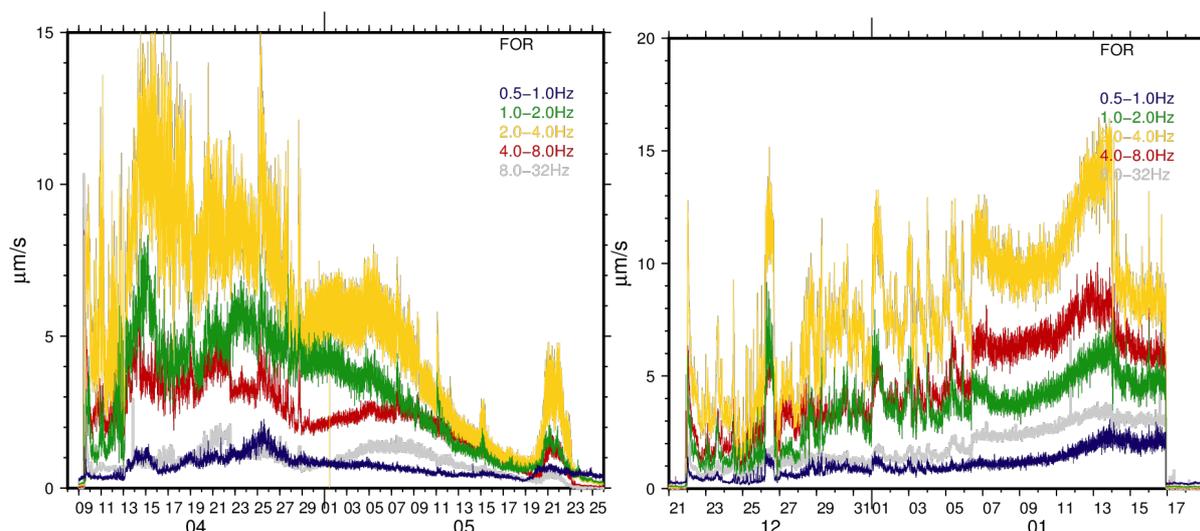


Figure 19 : Amplitude moyenne de la composante verticale à la station FOR calculée sur 1 minute et dans différentes bandes de fréquences au cours de l'éruption du 9 avril 2021 (à gauche) et de l'éruption du 22 décembre 2021 (à droite).

3 Validation du catalogue sismique du centre de données de l'IPGP

Dans le cadre des tâches de service du personnel de l'OVPF et en collaboration avec l'IPGP à Paris, la qualité de l'ensemble des données sismologiques acquises par l'OVPF est vérifiée. Cet effort participe à l'archivage des données au sein du centre de données de l'IPGP.

Références :

- Duputel, Z., V. Ferrazzini, O. Lengliné, L. Michon, F.R. Fontaine, F. Massin (2021), Seismicity of La Réunion island. *Comptes Rendus Géosciences*, 353, 237–255. doi:10.5802/crgeos.77
- 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. doi:10.1029/2018GL080895
- Lengliné, O., Z. Duputel, V. Ferrazzini (2016) Uncovering the hidden signature of a magmatic recharge at Piton de la Fournaise volcano using small earthquakes., *Geophys. Res. Lett.*, 43, 4255–4262. doi:10.1002/2016GL068383
- Michon, L., A. Di Muro, N. Villeneuve, C. Saint-Marc, P. Fadda, F. Manta (2013), Explosive activity of the summit cone of Piton de la Fournaise volcano (La Réunion island): A historical and geological review, *J. Volc. Geoth. Res.*, 264, 117–133. doi:10.1016/j.jvolgeores.2013.06.012
- Peltier, A., V. Famin, P. Bachelery, V. Cayol, Y. Fukushima, T. Staudacher (2008), Cyclic magma storages and transfers at Piton de La Fournaise volcano (La Reunion hotspot) inferred from deformation and geochemical data, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 270, 180–188. doi:10.1016/j.epsl.2008.02.042

V Géodésie

- **Collaborations nationales principales** : F. Beauducel (IPGP) ; O. Bousquet (LACy/Univ. Réunion/Météo France) ; J. Van Baelen (LACy/Univ. Réunion) ; J.L.Froger (LMV/OPGC) ; V. Cayol (LMV/OPGC) ; Q. Dumont (LMV) ; J.L. Froger (Univ. Saint-Etienne, ISDeform) ; J.L. Got (ISTerre) ; M. Gerbault (IRD Toulouse)
- **Collaborations internationales principales** : M. Poland (USGS) ; A. Bonforte (INGV) ; B. Taisne (EOS) ; F. Sigmundsson (University of Iceland)

1 Les réseaux de surveillance de la déformation de l'OVPF

En 2021, le réseau permanent de surveillance de la déformation du Piton de la Fournaise comprenait :

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

1.1. Le réseau GNSS

En 2021, le réseau GNSS (Global Navigation Satellite System) permanent de l'OVPF comprenait un total de 26 stations permanentes : 25 sur le massif du Piton de la Fournaise [dont 9 sur le cône terminal, 7 sur le flanc est dans les Grandes Pentés et le Grand Brûlé, 9 sur le pourtour extérieur de l'Enclos Fouqué ; Figure 20] et 1 au Maïdo, qui est une station OVPF / laboratoire du LACy de l'université de la Réunion.

Aux données de ces stations l'OVPF utilise les données de (i) la station de l'IGN, REUN (située à l'observatoire) (ii) de 7 stations RGP (Réseau GNSS Permanent de l'IGN), auxquelles l'OVPF a accès gratuitement via le site du RGP (depuis le 17/04/2018), (ii) ainsi que des 8 stations du réseau Lél@ (réseau de topographes de La Réunion) que l'OVPF achète et dont 2 des stations sont également incluses dans le réseau RGP (Figure 20).

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

En 2021, le rapatriement des données horaires jusqu'à l'observatoire concernait 11 des stations de l'OVPF. Le rapatriement des autres stations est toujours quotidien. Le rapatriement horaire permet de désengorger les flux et de traiter plus rapidement et fréquemment les données, ceci étant de première importance en cas de gestion de crise.

A l'avenir, nous souhaitons que toutes les stations puissent être rapatriées toutes les heures, voire même à une fréquence supérieure. Des tests sont toujours en cours sur ce sujet.

Une fois les données rapatriées, celles-ci sont automatiquement traitées par deux logiciels (GAMIT, GIPSYX (en remplacement de GIPSY depuis mi-2019). Les chaînes de calculs GAMIT et GIPSYX, complémentaires

(rapidité de GIPSYX et meilleure précision de GAMIT), tournent en parallèle. Les données sont ainsi traitées de manière horaire, quotidienne et également recalculées au bout de 24 jours afin de prendre en considération les orbites recalculées définitives mises à disposition dans ce délai de temps et d'affiner encore un peu plus la précision des calculs (Tableau 5).



	1h	24h		24 jours	
	GIPSY/TRACK	GAMIT	GIPSYX	GAMIT	GIPSYX
Résultats	Différentiel	Position	Position	Position	Position
Solution	Pour chaque époque de mesure (1pt/sec ou 1 pt/90 sec)	Journalière (1pt/jour)	Journalière (1pt/jour)	Journalière (1pt/jour)	Journalière (1pt/jour)
Précision (cm)	Horizontal (H) : 5 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 Ephémérides GPS	Ultra Rapides	Ultra Rapides / Rapides	Ultra Rapides / Rapides	Finales	Finales
Corrections troposphère/marées/...	-	Oui	Oui	Oui	Oui
Stabilisation du réseau	-	Oui	-	Oui	-
Durée de calcul	qq mins	1-3 h	qq secs / mins / stations	1-3 h	qq secs / mins / stations
Mise à disposition des données	+ 1 h	+ 1 jour et qq heures	+ 1 jour et qq minutes	+ 24 jours	+ 24 jours

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

A ce réseau permanent, se rajoute un réseau de 68 tiges, installé sur le cône terminal du Piton de la Fournaise et à sa base afin de densifier les mesures GNSS. En effet après chaque éruption, des campagnes de mesure sur le terrain sont organisées pour réitérer ce réseau, permettant ainsi de mieux contraindre spatialement la distribution des déformations de surface et de mieux contraindre la localisation et le cheminement du magma vers la surface lors de l'injection du dike (cf. section V.2.2).

1.2. Le réseau inclinométrique et extensométrique

Le réseau inclinométrique et extensométrique de l'OVPF se composait en 2021 de (Figure 21) :

- 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 5 couples d'inclinomètres Spectron (installés en surface), le tout installé sur 6 sites différents.

- 3 inclinomètres de forage LILY – 2 composantes (installés en 2010 et 2011 en bordure de la caldera de l'Enclos Fouqué),
- 3 extensomètres (3 composantes : ouverture, cisaillement, soulèvement), installés sur des fractures préexistantes.

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

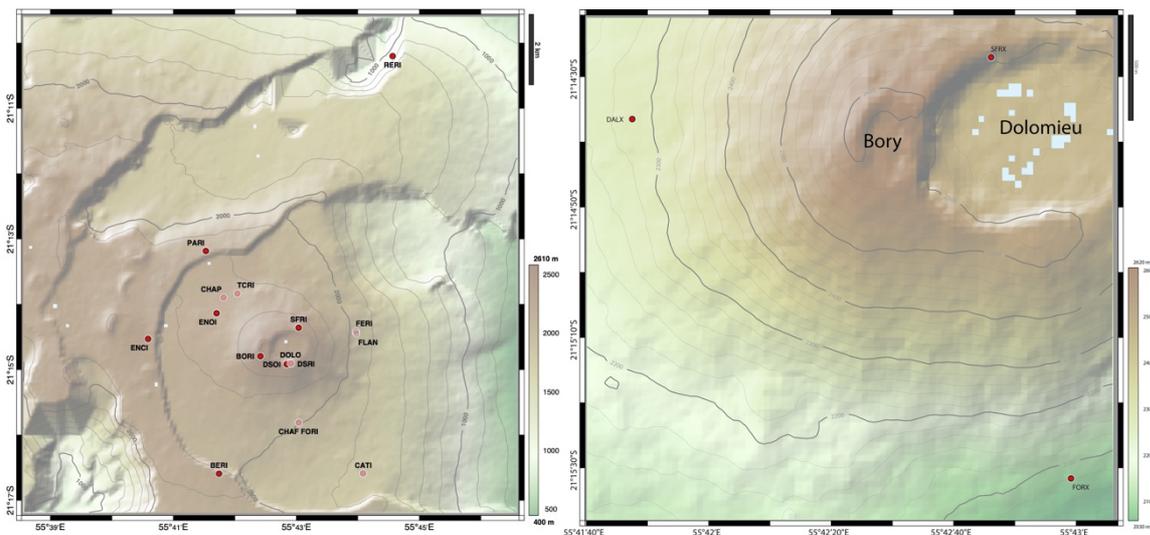


Figure 21 : Localisation des stations du réseau inclinométrique (à gauche) et extensométrique (à droite) de l'OVPF.

2 Observation des déformations en 2021

Les éruptions et l'intrusion de 2021 ont été précédées à la fois par des déformations à long et à court terme plus ou moins marquées, témoins de processus distincts en profondeur, à savoir la pressurisation du réservoir magmatique (déformations lentes à long terme) puis de la propagation finale du magma vers la surface (déformations rapides à court terme).

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

L'année 2021 fut marquée par des déformations inter-éruptives à long terme de l'édifice continues, de la mi-mars jusqu'à la fin de l'année, liées à une inflation de l'édifice (Figure 22).

Ces déformations lentes et faibles (jusqu'à 0,7 mm/jour max. d'élongation au sommet et à la base du cône et jusqu'à 0,3 mm/jour d'élongation en champ lointain, à l'extérieur de l'Enclos Fouqué) ont atteint en cumulé une douzaine de cm d'élongation à la base du cône (Figure 22). Ces déformations montrant une inflation de l'édifice, sont connues pour être liées à la pressurisation du réservoir magmatique superficiel (localisé aux alentours de 1-2 km sous la surface) lors de sa réalimentation par du magma profond (Figure 23 ; Peltier et al., 2009 ; Beauducel et al., 2020).

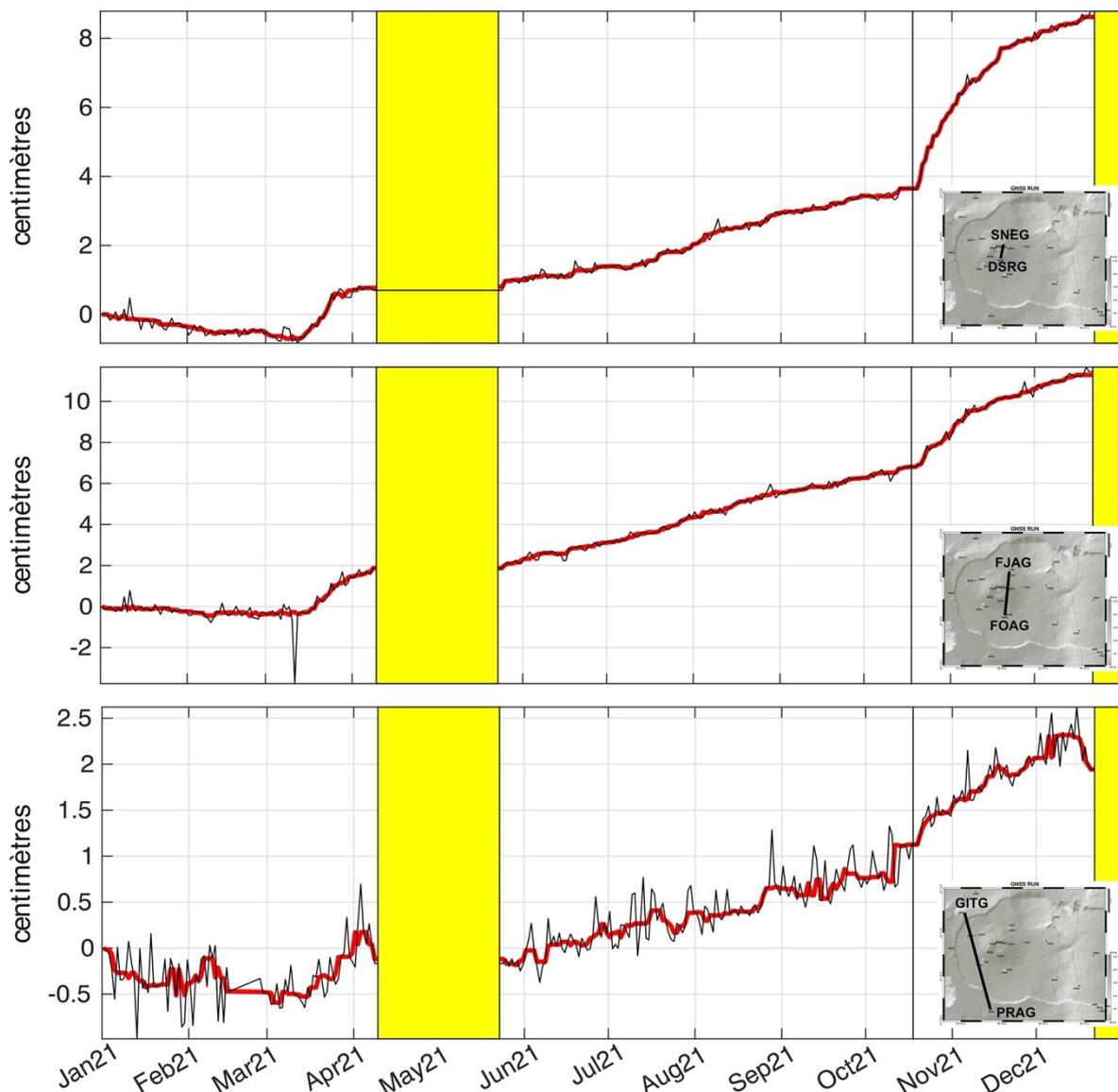


Figure 22 : Variation de la distance entre deux stations GNSS (lignes de base en cm) du sommet (en haut), de la base du cône (au milieu) et de l'extérieur de l'Enclos Fouqué (en bas) en 2021 (cf. localisation des lignes de base dans les encarts). Les courbes noires et rouges représentent respectivement les données brutes et les données lissées sur une fenêtre glissante de 10 jours. Les périodes jaunes correspondent aux périodes éruptives et les barres vertes 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.

A la différence de la période 2016-2020, où cette réalimentation s'était produite de manière discontinue avec des phases d'arrêt de plusieurs semaines, sans déformation significative (ou présentant une faible déflation), en 2021, l'inflation inter-éruptive a été continue de la mi-mars jusqu'à la fin de l'année. Ceci montre une activité profonde de réalimentation du réservoir magmatique superficielle intense et continue en 2021.

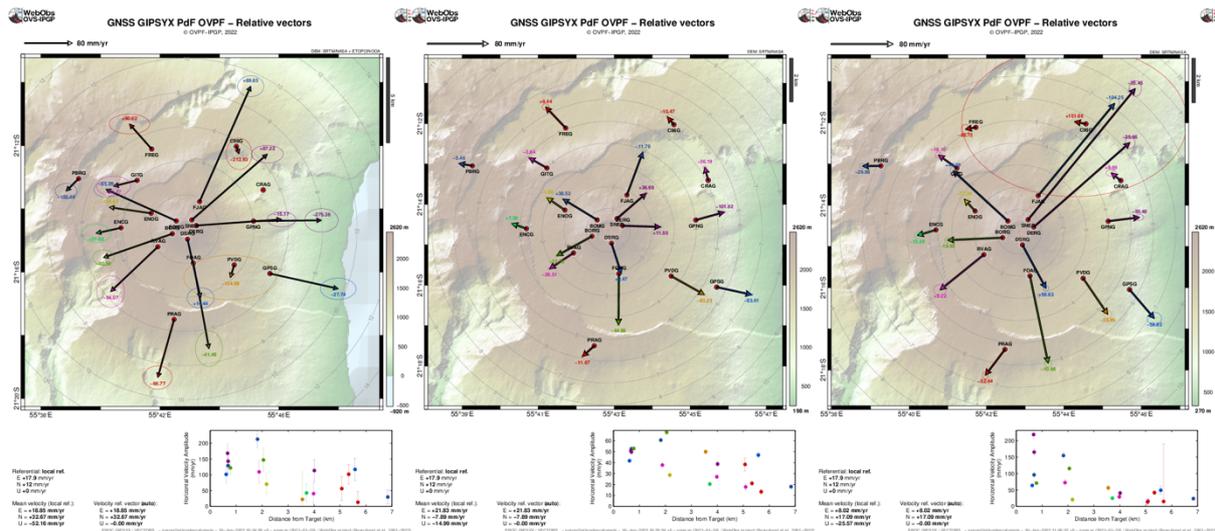


Figure 23 : Déplacements du sol (exprimés en vitesse) enregistrés sur les stations GPS à l’intérieur et sur le pourtour de l’Enclos Fouqué (à droite) entre le 15 mars et le 8 avril 2021, (au milieu) entre le 24 mai et le 17 octobre 2021 et (à droite) entre le 19 octobre et le 20 décembre 2021. Les déplacements 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 ces figures, les données sont corrigées du mouvement de la plaque (©OVPF-IPGP).

Sur le flanc est, suite à l’éruption du 25-27 octobre 2019 (flanc sud sud-est du volcan entre 1060 m et 990 m d’altitude) une accélération des déplacements avait été observée sur la partie haute du flanc est (Figure 24). Plusieurs hypothèses ont été avancées concernant l’origine de ces déformations : des mouvements de fluides persistants en profondeur vers ce flanc qui a été intrudé à de nombreuses reprises en 2019-2020 ; la fermeture/contraction des dikes/sills ayant alimenté les éruptions de 2019-2020 ; une déstabilisation de ce flanc.

En 2021, la subsidence et le déplacement vers l’est enregistrés au niveau de la station GPSG, localisée à 1005 m d’altitude sur le flanc est, ont ralenti et les taux de déplacement étaient redevenus similaires à ceux d’avant l’éruption du 25-27 octobre 2019 (Figure 24).

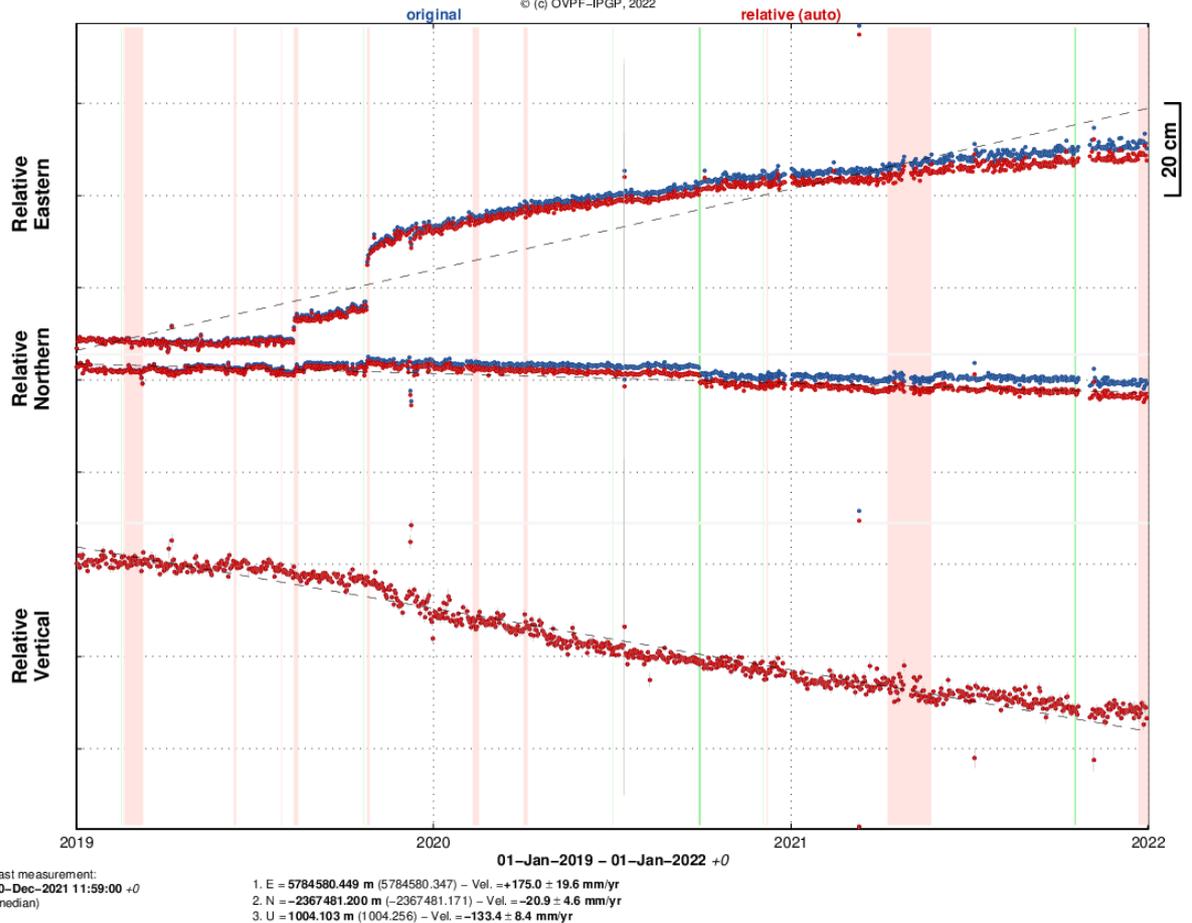


Figure 24 : Déplacements enregistrés sur la station GPS "GPSG", localisée dans la partie haute et sud des Grandes Pentes à 1005 m d'altitude entre le 1^{er} janvier 2019 et le 1^{er} janvier 2022 (les périodes éruptives et intrusives sont représentées respectivement en rouge et vert). En bleu les données brutes, en rouge les données corrigées du mouvement de la plaque. (Haut) Déplacements est-ouest, (milieu) déplacements nord-sud, (bas) déplacements verticaux.

Suite à l'intrusion du 28-30 septembre 2020 sous le flanc est du volcan (arrêt de l'intrusion dans le secteur haut des Grandes Pentes), une accélération similaire 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 25). Très vite en 2021 le taux de subsidence est revenu au taux observé avant l'intrusion. L'intrusion du 18 octobre 2021, qui s'est arrêtée en profondeur un peu plus au nord dans le haut de la Plaine des Osmondes, n'a pas engendré de nouvelle accélération (Figures 24, 25).

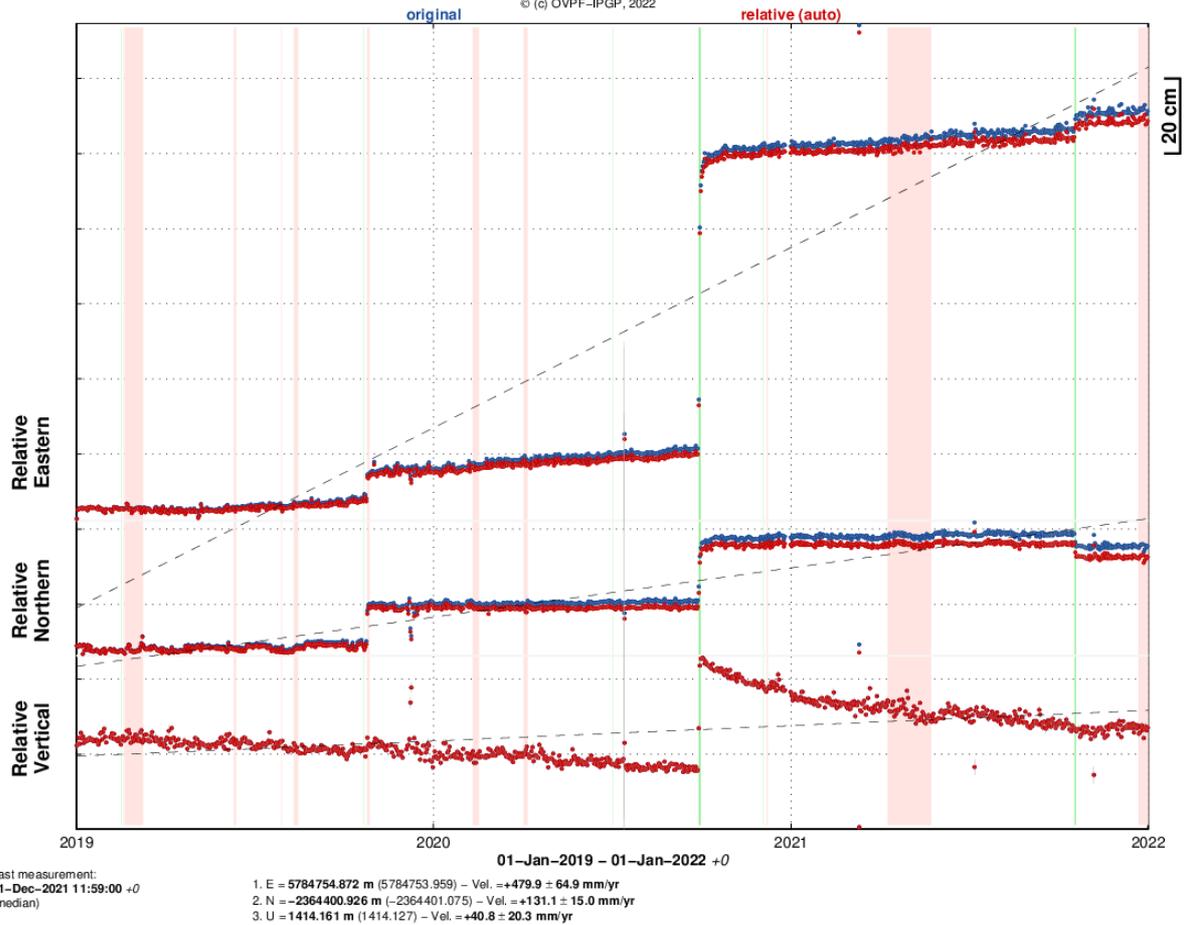


Figure 25 : Déplacements enregistrés sur la station GPS "GPNG", localisée dans la partie haute et nord des Grandes Pentes à 1414 m d'altitude entre le 1^{er} janvier 2019 et le 1^{er} janvier 2022 (les périodes éruptives et intrusives sont représentées respectivement en rouge et vert). En bleu les données brutes, en rouge les données corrigées du mouvement de la plaque. (Haut) déplacements est-ouest, (milieu) déplacements nord-sud, (bas) déplacements verticaux.

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

Les déformations lentes à long terme de l'édifice furent interrompues par des déformations beaucoup plus rapides correspondant aux trois injections de magma vers la surface (ouvertures de dike) qui ont conduit aux deux éruptions : éruption du 9 avril - 24 mai 2021, éruption du 22 décembre 2021 - 17 janvier 2022 et à l'intrusion du 18 octobre 2021 (Figure 26).

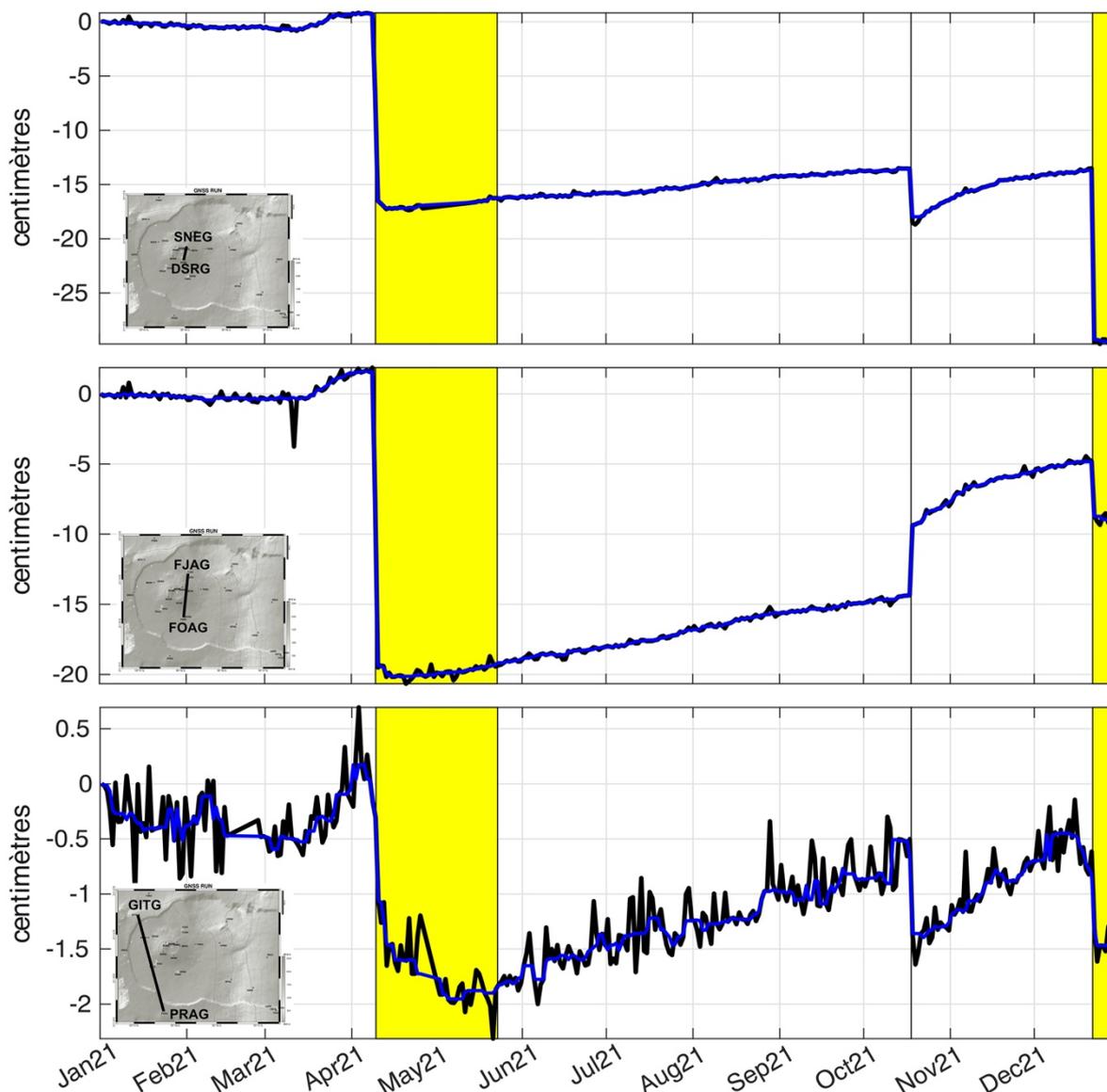


Figure 26 : Variation de la distance entre deux stations GNSS (lignes de base en cm) du sommet (en haut), de la base du cône (au milieu) et de l’extérieur de l’Enclos Fouqué (en bas) en 2021 (cf. localisation des lignes de base dans les encarts). Les courbes noires et bleues représentent respectivement les données brutes et les données lissées sur une fenêtre glissante de 10 jours. Les périodes jaunes correspondent aux périodes éruptives et les barres vertes aux intrusions. Par rapport à la Figure 22, l’ensemble du signal a été conservé pour faire ressortir les déformations à court terme précédant les éruptions de quelques minutes/heures.

Lors de ces trois phases d’injection de dike vers la surface, les réseaux de GNSS permanents ont enregistré des déplacements rapides notables de la surface, de l’ordre de la trentaine de centimètres max., au niveau du cône terminal.

Ceci a pu être également bien caractérisé grâce au réseau de 71 tiges de réitération installées sur le cône terminal et à sa base. Ainsi pour ces injections, les campagnes de mesures ont permis de retracer le trajet du dike en profondeur, à partir des déplacements de surface (décimétriques) de part et d’autre de la trajectoire du dike (Figures 27, 28, 29).

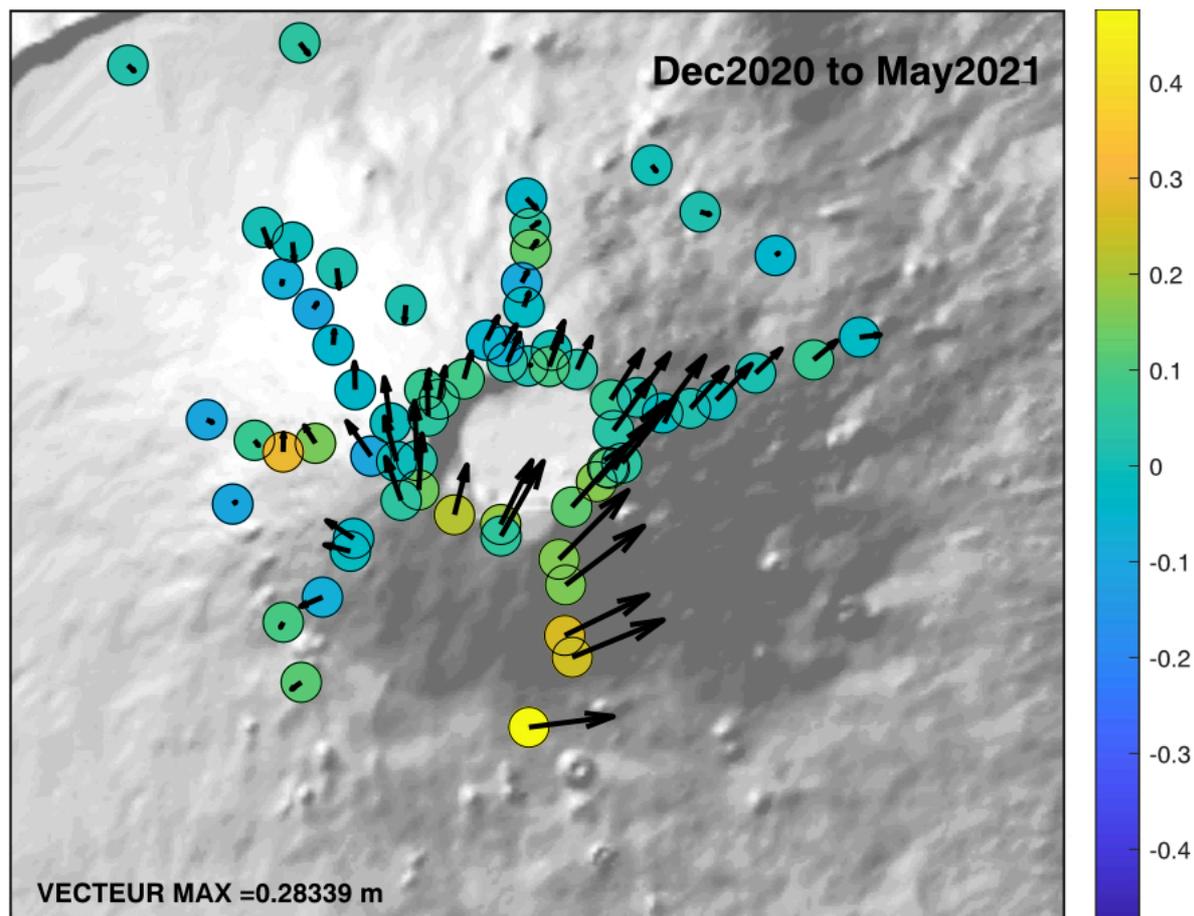


Figure 27 : Déplacements de surface enregistrés au niveau du cône terminal par le réseau de réitération GNSS de l'OVPF lors de campagnes de réitération GNSS sur le terrain encadrant l'éruption du 9 avril-24 mai 2021. Les vecteurs représentent les déplacements horizontaux (échelle donnée par la valeur 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).

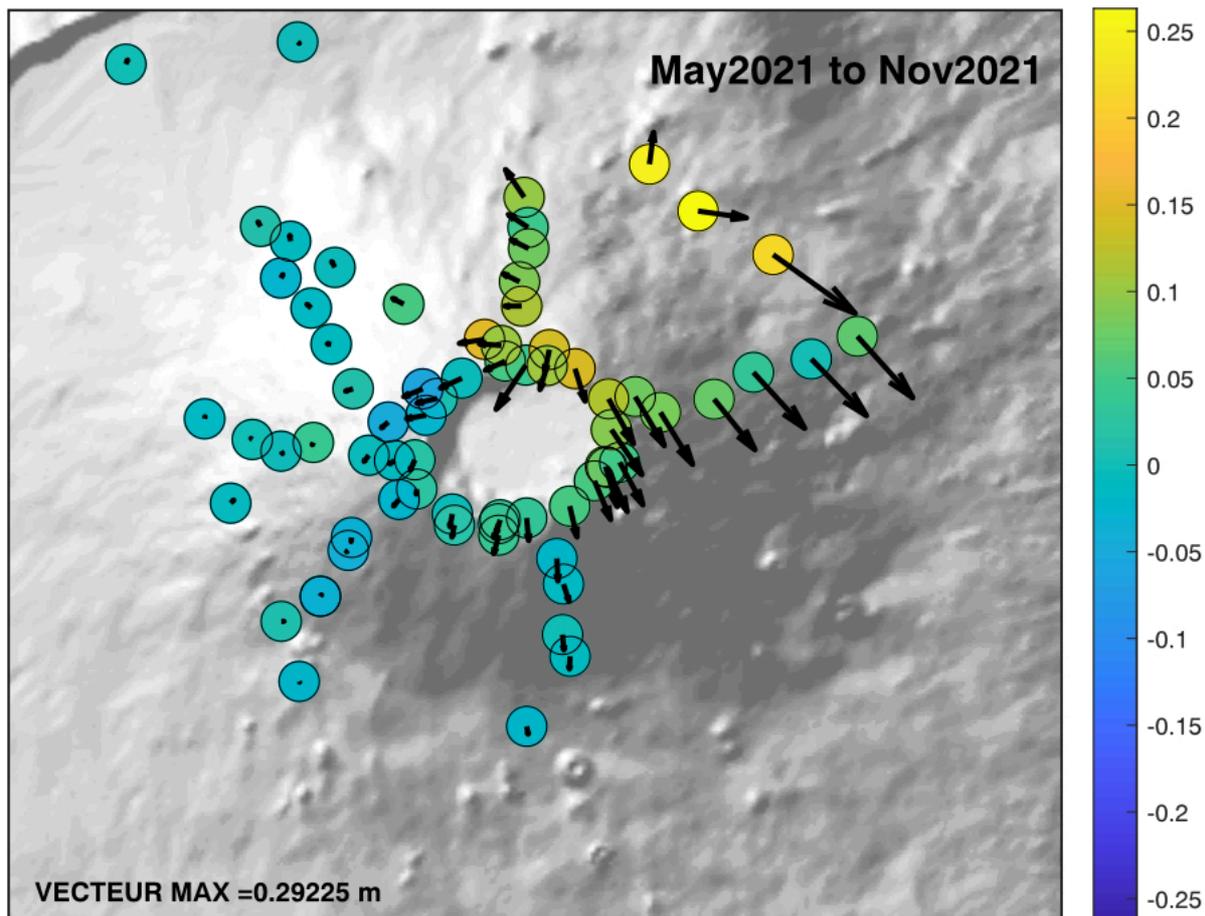


Figure 28 : Déplacements de surface enregistrés au niveau du cône terminal par le réseau de réitération GNSS de l'OVPF lors de campagnes de réitération GNSS sur le terrain encadrant l'intrusion du 18 octobre 2021. Les vecteurs représentent les déplacements horizontaux (échelle donnée par la valeur du vecteur maximum en bas à gauche) et les points colorés représentent les déplacements verticaux (échelle donnée par la barre colorée à droite, en m).

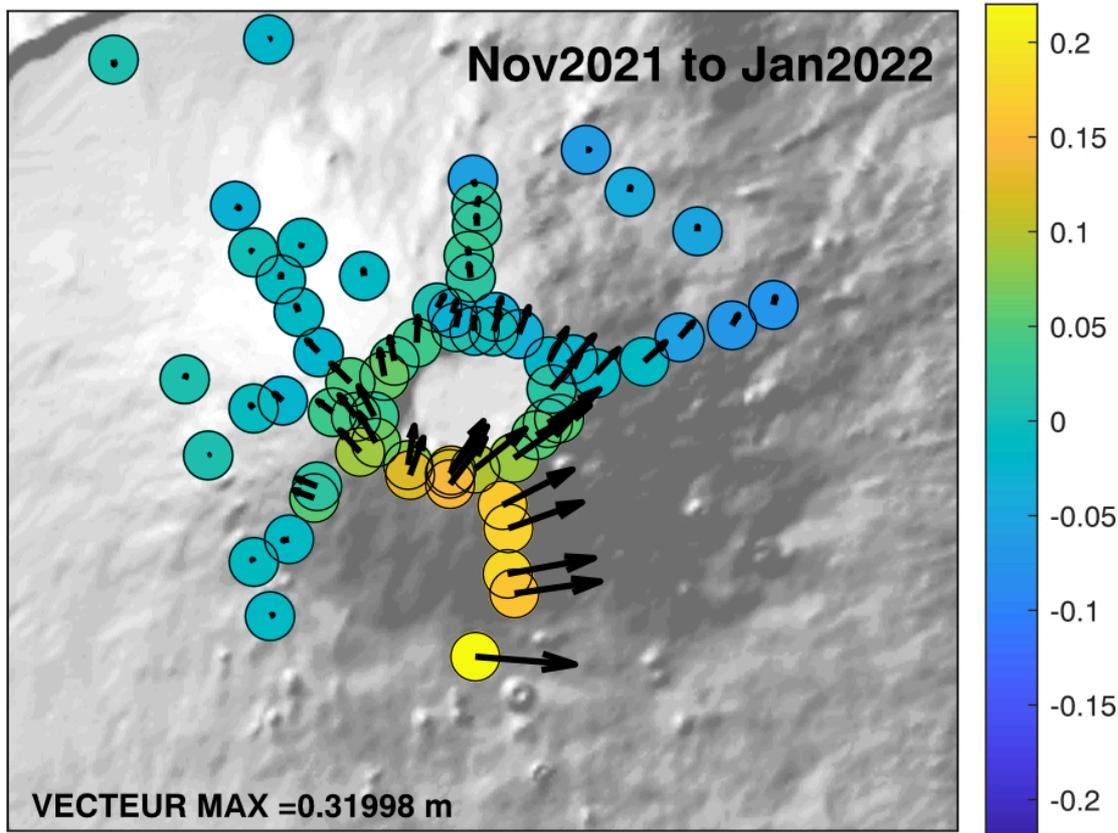


Figure 29 : Déplacements de surface enregistrés au niveau du cône terminal par le réseau de réitération GNSS de l'OVPF lors de campagnes de réitération GNSS sur le terrain encadrant l'éruption du 22 décembre 2021 – 17 janvier 2022. Les vecteurs représentent les déplacements horizontaux (échelle donnée par la valeur du vecteur maximum en bas à gauche) et les points colorés représentent les déplacements verticaux (échelle donnée par la barre colorée à droite, en m).

Ces données montrent bien que pour ces injections 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.

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 des deux éruptions de 2021 et de l'intrusion du 18 octobre 2021 (Figure 30). 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 avec précision et en temps réel la zone du volcan intrudé par le dike lors d'une crise.

Ainsi, ils ont permis de définir à l'avance :

- . environ 3 heures 30 avant le début de l'éruption du 9 avril 2021 que le flanc sud du volcan était intrudé par le magma,
- . environ une 40^{aine} de minutes après le début de la crise sismique le 18 octobre 2021 que flanc nord nord-est du volcan était intrudé par le magma,
- . environ 1 heure avant le début de l'éruption du 22 décembre 2021 que flanc sud du volcan était intrudé par le magma.

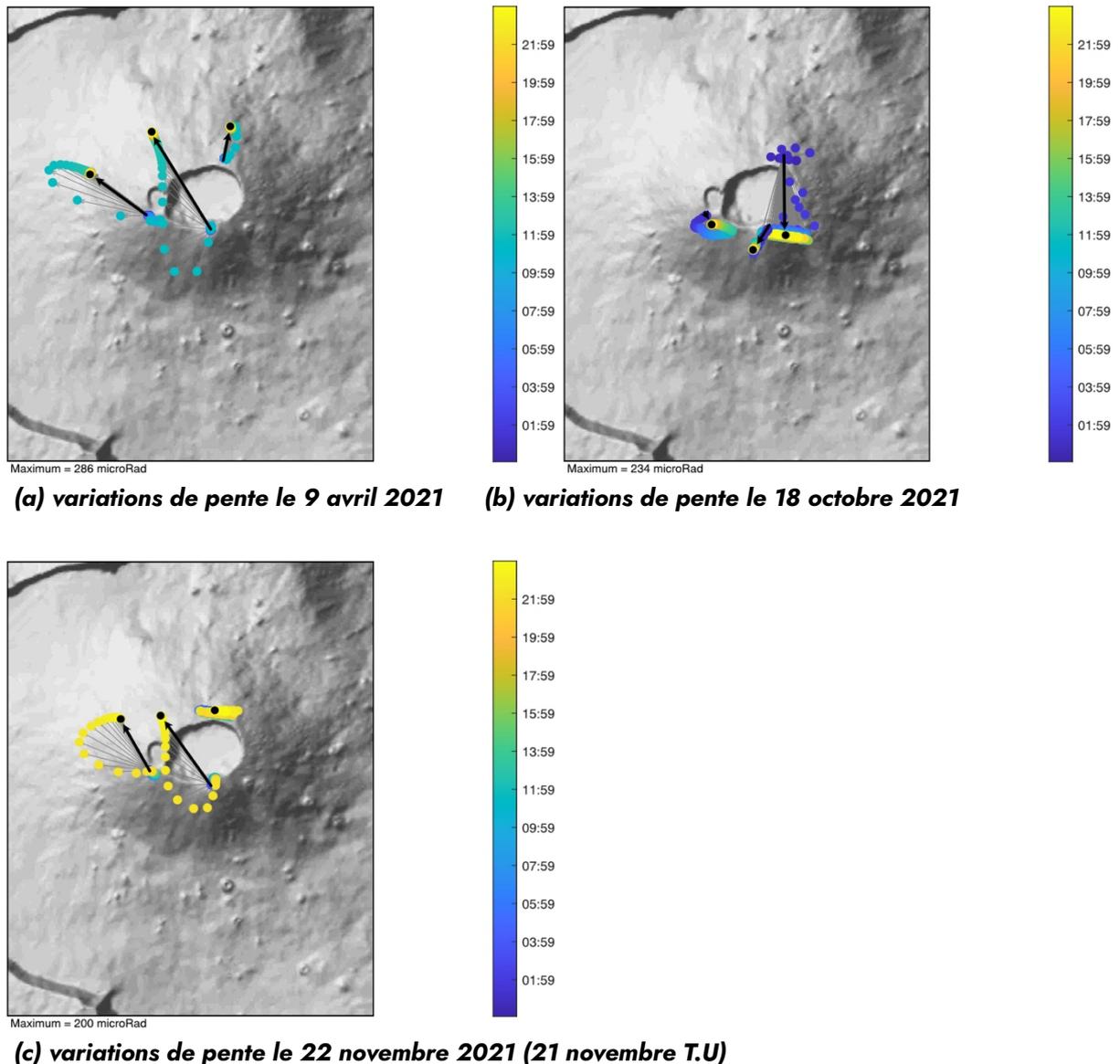


Figure 30 : Variations de pente (en microradians) enregistrées sur le réseau inclinométrique de l’OVPF les 9 avril 2021, 18 octobre 2021 et 22 novembre 2021 (21 novembre T.U.). La barre colorée représente le temps au cours de la journée et les flèches noires, les variations de pentes finales.

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

VI Géochimie

- **Collaborations nationales principales** : M. Ader (IPGP), P. Besson (IPGP) ; P. Burckel (IPGP) ; S. Nowak (P7) ; I. Cocca (P7) ; A. Groleau (IPGP), L. Gurioli (UCA/OPGC) ; D. Jezequel (IPGP), S. Moune (OPGC/IPGP) ; I. Vlastelic (UCA) ; G. Boudoire (UCA/OPGC), S. Thivet (UCA/OPGC) ; P. Bachèlery (UCA/OPGC)
- **Collaborations internationales principales** : A. Aiuppa (Univ. Palermo) ; M. Liuzzo (INGV Palermo) ; A. Rizzo (INGV Palermo) ; F. Grassa (INGV Palermo) ; G. Giudice (INGV Palermo) ; S. Gurrieri (INGV Palermo) ; B. Galle (Chalmers Univ., Suède) ; S. Arellano (Chalmers Univ., Suède)

1 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 septembre 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 Palermo 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 CO₂ par le sol ; Figure 31) et de l'instrumentation portable du même type.

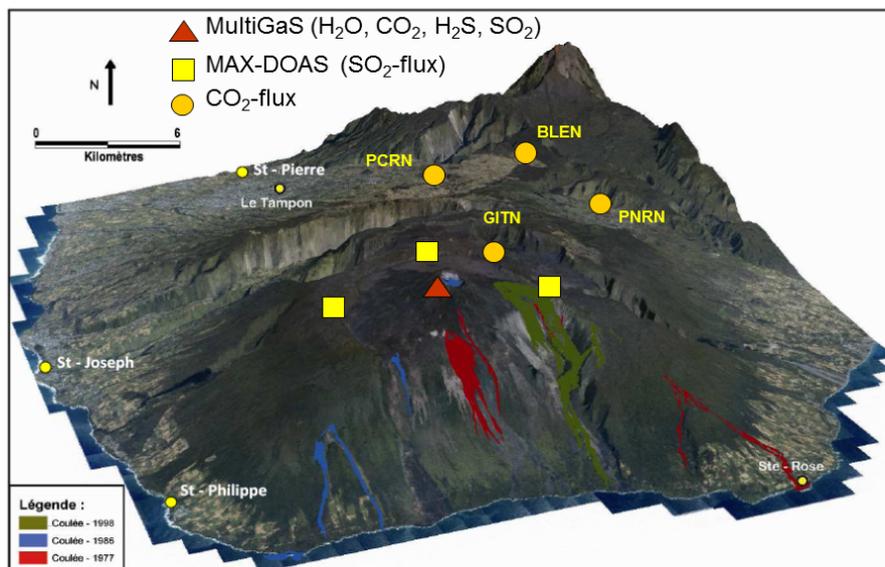


Figure 31 : Localisation des stations de l'OVPF pour le suivi géochimique des émissions gazeuses sur le massif du Piton de la Fournaise.

Les stations permanentes sont couplées à des capteurs qui permettent de quantifier les paramètres environnementaux (P, T, Rh, vitesse et direction du vent, pluviométrie). L'analyse et la transmission en temps réel vers l'OVPF des données géochimiques permettent 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 le nombre important d'éruptions qui a 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.

2 Émissions de SO₂ (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 SO₂ (ppm.m) dans l'atmosphère sur le sommet du Piton de la Fournaise (angle de scan par rapport à la verticale : 60°).

Le réseau n'a pas subi de modification majeure ces 15 dernières années. Une panne majeure a affecté la station localisée sur le rempart sud de l'Enclos Fouqué (Bert) entre juin et décembre 2021. L'investissement de l'équipe technique de l'OVPF et les échanges réguliers avec les collègues du projet NOVAC (Equipe de B. Galle et S. Arellano ; Université de Chalmers, Suède) ont permis de remettre l'ensemble du réseau en état de fonctionnement lors de l'éruption de décembre 2021 – janvier 2022.

La conversion des mesures d'épaisseur optique en flux de SO₂ est possible, à condition de connaître les 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 SO₂ au niveau mondial avec plus de 10.000.000 mesures sur 41 volcans au travers le monde. La distribution des données par le réseau NOVAC est en train d'être finalisée par le groupe de l'Université de Chalmers et pour l'instant reste à la charge de chaque observatoire.

Dans le cadre du projet Européen CAMS-81 (Copernicus Atmosphere Monitoring Service), coordonné par l'ECMWF (European Centre for Medium Weather Forecast), le groupe de Chalmers a relancé une ré-analyse homogène de l'ensemble de la base de données acquise à l'échelle mondiale par NOVAC (Arellano et al., 2021 ; Figures 32, 33). Cette base de données acquises au sol a été intégrée et comparée avec celle acquise par satellite. Elle est très utile pour les études géochimiques (e.g. bilans globaux et locaux) et géophysiques, pour la quantification du risque, la validation des données satellitaires et les recherches sur le changement climatique et dans le domaine de l'atmosphère. Pour aboutir à cela, l'ECMWF a fourni l'accès aux données météorologiques globales avec une résolution horizontale assez fine (0,125 x 0,125 degrés).

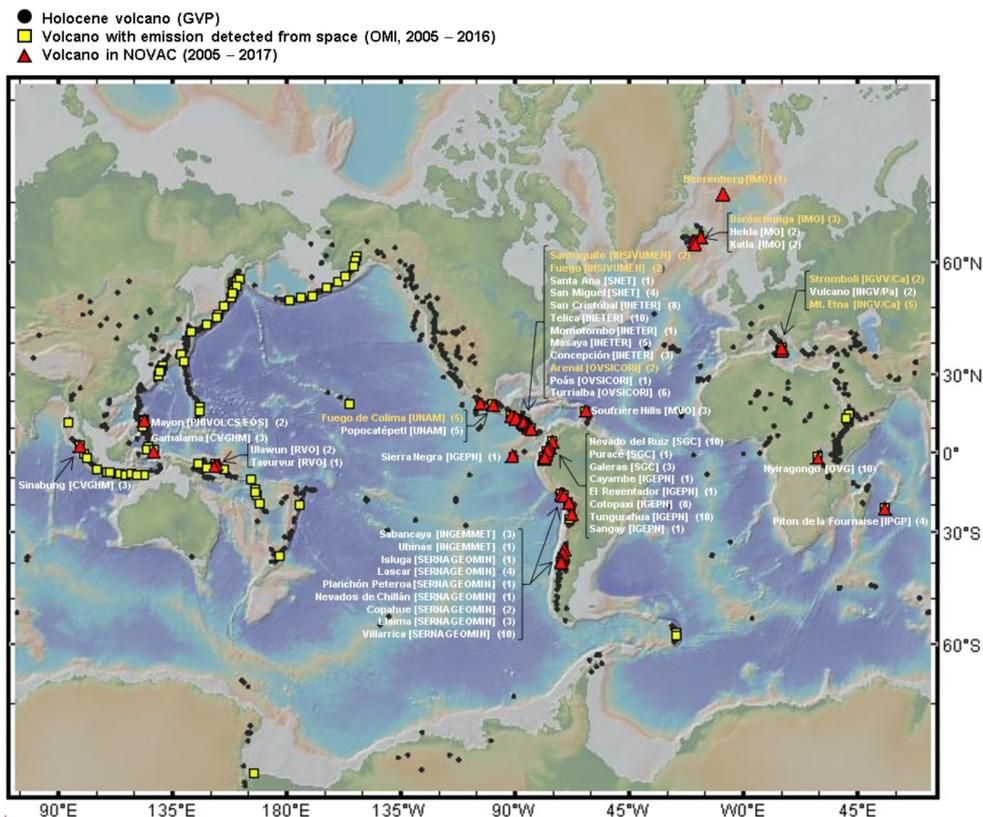


Figure 32 : Localisation des volcans équipés en scanning DOAS par le réseau NOVAC (triangles rouges) et localisation des volcans dont les émissions en SO₂ ont été détectées par satellite (OMI ; Carn et al., 2017).

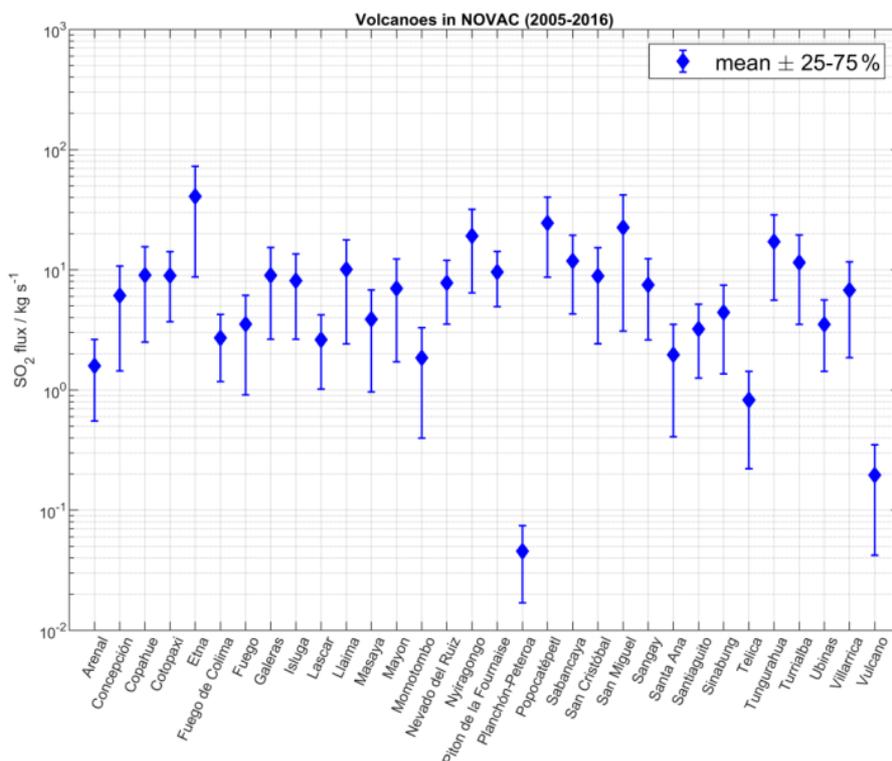


Figure 33 : Distribution statistique des émissions moyennes journalières des 32 volcans suivis par le réseau NOVAC au cours de la période 2005-2017.

Sur l'ensemble de la période 2008 - 2021, le groupe de Chalmers a produit 3 types de réévaluations des jeux de données de l'OVPF, basés sur trois sources de données météorologiques : i) des données ECMWF-ERA-interim ; grille de 0,125 x 0,125 degrés, avec un pas temporel de 6h et jusqu'à 60 niveaux verticaux entre le sol et 0,1 hPa ; ii) des données ECMWF-ERA-5 qui ont une résolution spatiale similaire à celle de ERA-interim, mais une résolution temporelle 6 fois supérieure. Ce modèle sera utilisé dans le futur pour le post-traitement des données ; iii) des données GDAS (Global Data Assimilation System) de la NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration – USA), grille de 1x1 degré, avec un pas temporel de 3h et jusqu'à 23 niveaux verticaux entre le sol et 20 hPa.

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

Cette ré-analyse globale des données de flux de SO₂ a permis pour la première fois d'intégrer le Piton de la Fournaise dans le catalogue mondial des volcans actifs en termes de flux gazeux (Arellano et al., 2021). Ce bilan mondial montre que, lors de ses phases d'activité éruptive, le Piton de la Fournaise atteint des taux moyens d'émission d'environ 10 kg/s, qui sont 2 à 4,3 fois plus faibles que les taux d'émissions moyens des grands volcans émetteurs de SO₂ (Etna, Popocatepetl, Nyiragongo), mais il peut atteindre des taux sensiblement proches de ceux des volcans basaltiques à conduit ouvert tels que le Villarica (Chili).

En 2021, le réseau NOVAC a parfaitement détecté l'augmentation des émissions de SO₂ pendant l'ensemble de l'activité éruptive (2 éruptions ; Figure 34) sur les 3 stations, bien que le jeu de données de la station BERT (au sud) soit moins complet du fait d'opérations de maintenance.

Les deux éruptions ont été relativement longues (avril-mai 2021 : 44 jours ; décembre 2021-janvier 2022: 26 jours) et ont été caractérisées par une diminution progressive du taux d'émission entre le début et la fin de l'activité.

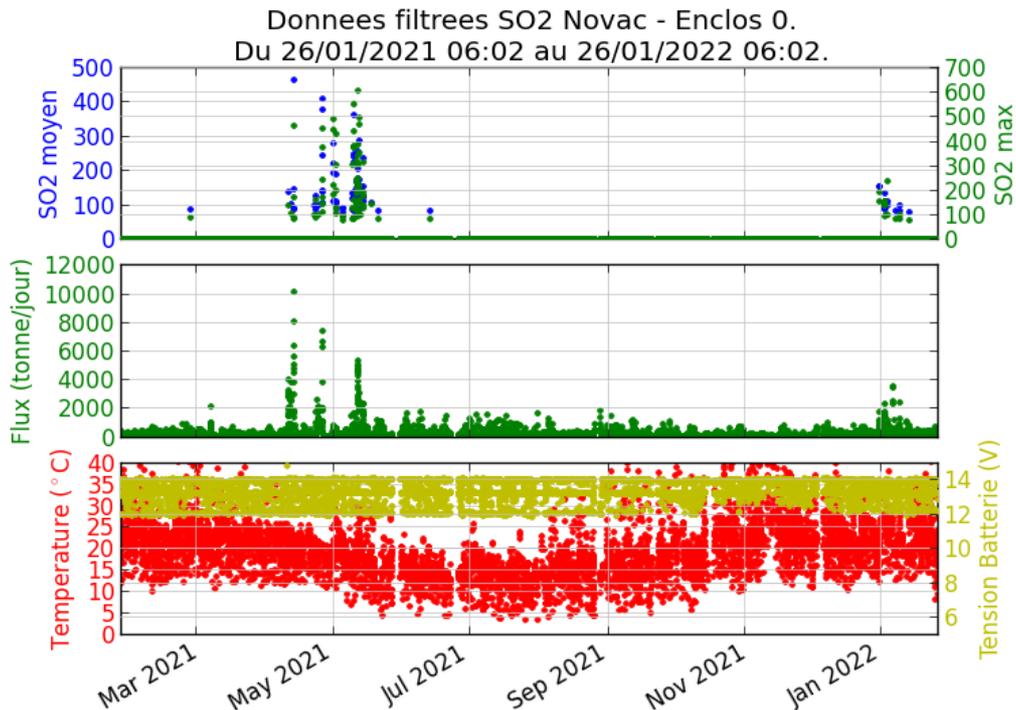


Figure 34 : Routine de surveillance des émissions de SO_2 - exemple sur une année avec la station de Enclos 0 (rempart ouest du volcan) ; En haut) épaisseur optique (ppm.m) de SO_2 dans l’atmosphère sommitale du Piton de la Fournaise, mesurée par scanning DOAS. Données filtrées représentatives des détections 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 d’avril-mai 2021. En bas) conditions opérationnelle du spectromètre.

Une comparaison détaillée (Verdurme et al., 2022) a été effectuée entre les émissions de SO_2 estimées par plusieurs méthodes (Ground based DOAS – NOVAC ; Satellites – OMI, OMPS, TROPOMI ; Méthode pétrologique – à partir des volumes de lave émis et des analyses des inclusions vitreuses dans les minéraux). L’étude a porté sur les éruptions du Piton de la Fournaise pour la période 2007 – 2020.

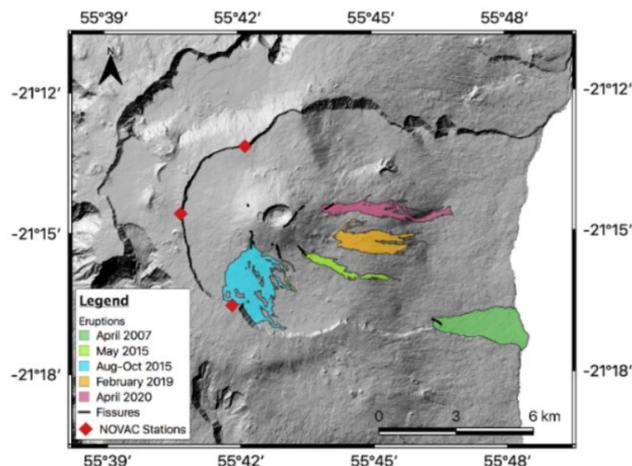


Figure 35 : Localisation des stations NOVAC (diamants rouges) et de quelques éruptions de la période 2007-2020. La géométrie actuelle du réseau NOVAC aboutit à une sous-estimation des flux de SO_2 émis par les éruptions situées à l’est du cône principal.

La comparaison montre que :

- i) Les flux de SO₂ estimés par NOVAC ou par satellite sont en bon accord quand les panaches sont situés près du cône central du Dolomieu.
- ii) La géométrie actuelle du réseau aboutit à une sous-estimation des flux de SO₂ pour des éruptions situées en proximité ou sur le flanc est du volcan (Figure 35).
- iii) La conversion des flux de SO₂ en flux de lave demande de prendre en compte le degré variable de dégazage pré-éruptif des magmas du Piton de la Fournaise.
- iv) L'étude a montré la présence de deux types d'éruptions au Piton de la Fournaise (Figure 36). Un premier type présente une décroissance exponentielle du débit de lave dans le temps et il est associé à l'émission de magmas dégazés et dont la composition est constante dans le temps (ex : mai 2015). Un deuxième type montre une augmentation du débit dans le temps et l'émission de magmas plus chauds et riches en gaz lors de la phase finale des éruptions (ex : août 2015 ; avril 2020). La présence d'une variation continue de la composition des laves aboutit à la combinaison des deux types lors de certaines éruptions (ex : février 2019)

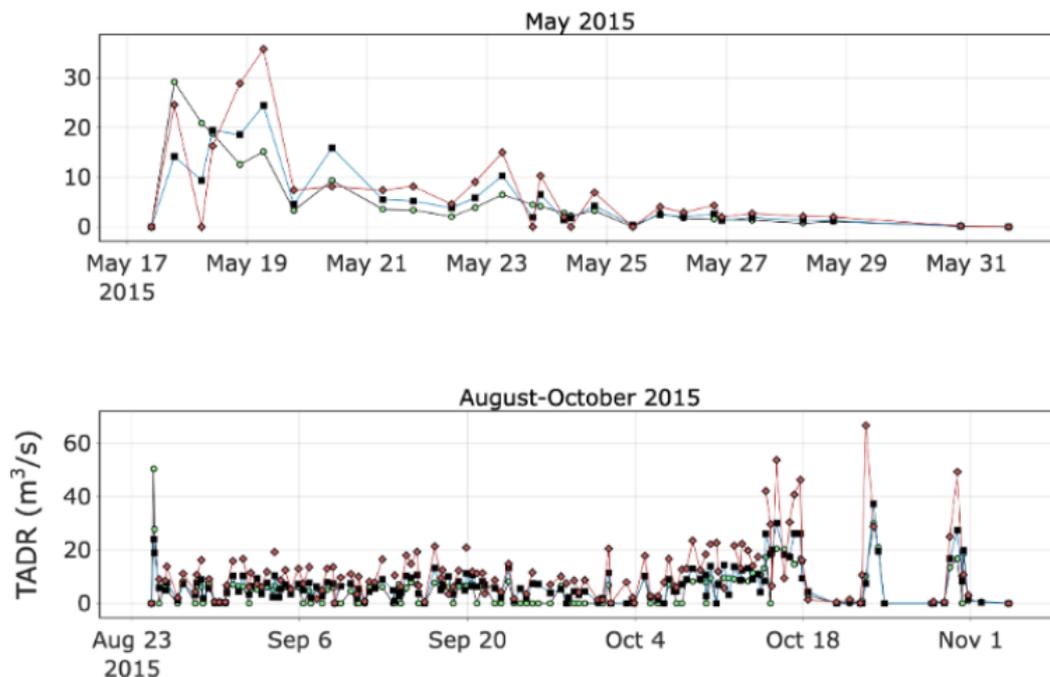


Figure 36 : Évolution du TADR (Time-averaged discharge rate ; flux en m³/s) au cours des deux types principaux d'éruptions du Piton de la Fournaise (exemples : mai 2015 – débit décroissant ; août 2015 – débit croissant dans le temps) identifiés sur la base de l'évolution temporelle des débits de magma, de gaz et de composition des laves (Coppola et al., 2017 ; Verdurme et al., 2022).

Nous avons testé la possibilité d'estimer l'évolution des débits moyens journaliers de lave émis pendant la longue éruption d'avril-mai 2021 (Figure 37) à partir des flux de SO₂ acquis en temps réel en prenant en compte la variabilité connue des concentrations pré-éruptives de soufre dissous dans les magmas. L'analyse effectuée a été communiquée dans les communiqués quotidiens de l'OVPF lors de l'éruption et aux collaborateurs en charge du suivi satellitaire des émissions du Piton de la Fournaise et de la modélisation des écoulements de laves. Le suivi a permis de montrer la diminution progressive du débit de lave après le 13

avril et d'identifier des phases de courte intensification les 21 et 26 avril et le 12 mai. Le volume final de lave émis en surface ainsi estimé (13 Millions de m³) a été validé par les mesures stéréo-photogrammétriques.

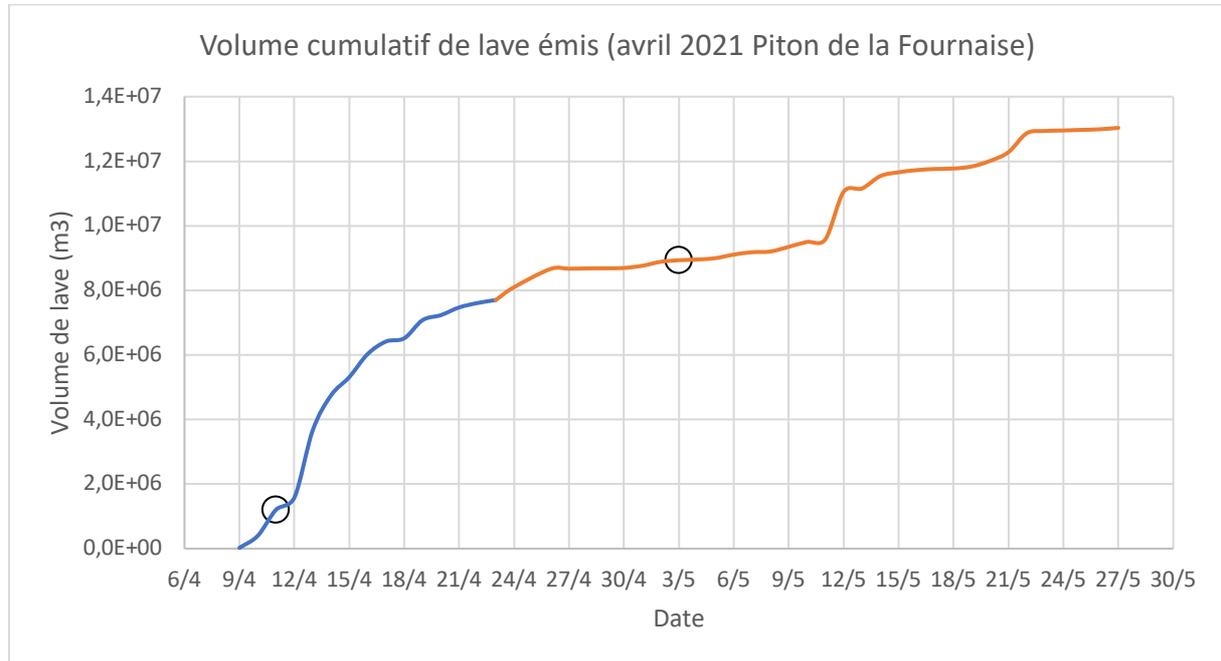


Figure 37 : Évolution cumulative des volumes de lave émis pendant l'éruption d'avril-mai 2021 estimés à partir des émissions de SO₂ mesurées en temps réel par le réseau DOAS NOVAC.

3 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 par la détermination des excès de H₂O, CO₂, SO₂ et H₂S par rapport à l'atmosphère (méthode MultiGaS ; collaboration avec l'Université de Palerme (A. Aiuppa) et l'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 ; stations de mesures « DSO » et « Piton2 », installées en alternance) est installée au sommet du Piton de la Fournaise. Ces mesures permettent la caractérisation des émissions de basse température intra-calderiques et des phases de pollution liées aux panaches éruptifs, tandis qu'une valise portable est déployée à proximité des sites éruptifs pour l'analyse des émissions à haute température (panaches ; fumerolles ; laves).

Depuis l'installation de la station MultiGaS au sommet du volcan, la surveillance en continu des émissions gazeuses du Piton de la Fournaise avait déjà permis de confirmer que i) la vapeur d'eau est le composant principal des faibles émissions sommitales, suivie par le dioxyde de carbone (CO₂), ii) le soufre est présent sous forme de H₂S 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 SO₂ détectés par le réseau DOAS hors crise éruptive par l'oxydation de l'H₂S 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 des augmentations des concentrations en espèces soufrées et en CO₂ avant les éruptions.

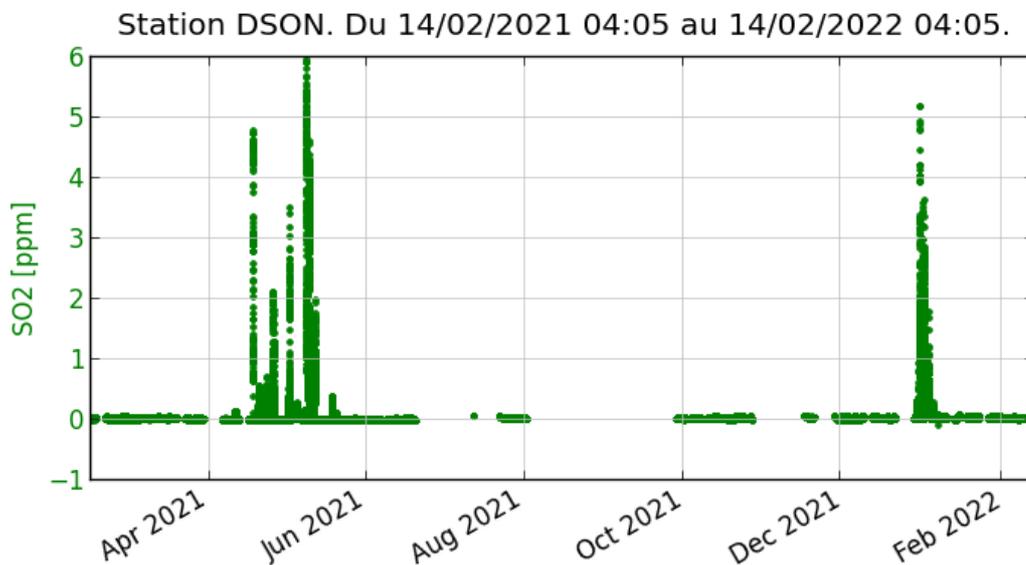


Figure 38 : Concentrations molaires en SO₂ (ppmv) dans l'atmosphère au sommet du Piton de la Fournaise mesurées par la station MultiGaS de l'OVPF en 2021 (station DSO).

En 2021, la station a fonctionné de façon discontinue pendant la période juillet – août 2021 mais elle a pu enregistrer les éruptions d'avril-mai 2021 et de décembre 2021-janvier 2022. On remarquera les concentrations très importantes détectées au sommet du cône central suite à ces éruptions situées près de son flanc sud (Figure 38). L'augmentation dans le temps des concentrations près du sol, malgré la diminution des débits éruptifs, s'explique par la diminution de la hauteur du panache éruptif et sa dispersion sous l'influence des vents de basse altitude.

Le vieillissement des capteurs IR avait déjà dans le passé requis une rallonge des temps de chauffage pour essayer de stabiliser les comptages dès leur début. La station de recharge (DSO) a été détruite pendant son installation en champs proche de la bouche éruptive d'avril 2021. La station de mesure « Piton2 » montre une instabilité au niveau du capteur H₂O notamment suite aux très forts événements pluvieux et demande d'être recalibrée.

Lors de l'éruption de décembre 2021-janvier 2022, la présence de bullages gazeux au sein du Grand Étang a été signalée à l'OVPF (Figure 39). Une reconnaissance effectuée le 27/12/2021 a permis de localiser trois sites de bullage dans le secteur oriental du lac et d'effectuer leur analyse in situ par valise portable MultiGaS. L'analyse in situ montre que les bullages ne sont pas associés à une anomalie thermique et ils sont très pauvres en CO₂. Un échantillonnage des fluides a été effectué pour l'analyse chimique et isotopique complète et pour déterminer ainsi leur origine. Dans le sol, les concentrations sont plus importantes, même si les données isotopiques suggèrent qu'ils aient une origine organique. Les discussions avec les habitants du secteur indiquent que ces bullages apparaissent régulièrement au sein de l'étang, probablement en lien avec le début de la saison des pluies et des circulations de fluides très aérés au sein des couches sédimentaires.

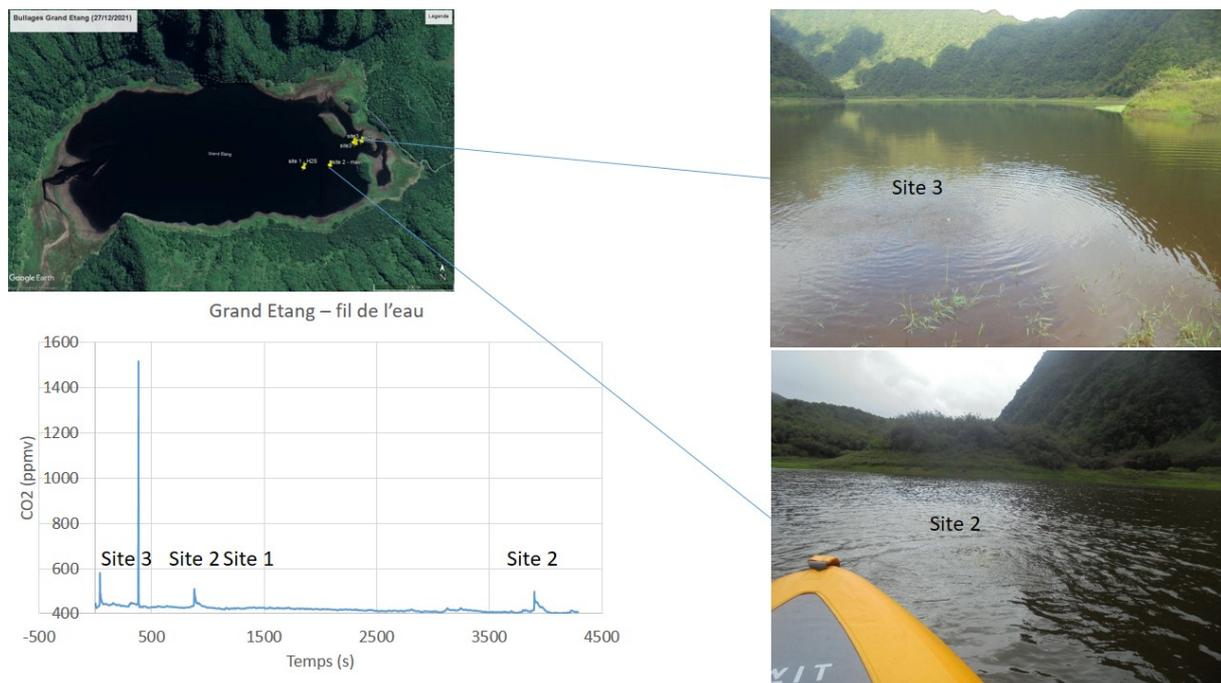


Figure 39 : Bullages pauvres en CO₂ observés le 27/12/2021 au sein du Grand Étang.

4 Émissions de CO₂ par le sol

Depuis 2012, une cartographie et des analyses chimiques des émissions de CO₂ par le sol sont réalisées. Les données acquises montrent que les émissions de CO₂ 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). Les données acquises 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 CO₂ 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 CO₂ au sein de la salle pédagogique d'accueil du Parc National a été mise en place en collaboration avec l'équipe du Parc National. Une troisième station a été installée en avril 2015 à l'extrémité nord-ouest de la rift-zone (BLEN - secteur de Piton bleu).

Suite à des campagnes de mesures géophysiques (Polarisation Spontanée – PS et tomographie électrique) et de CO₂ effectuées en collaboration avec l'Université de la Réunion (A. Finizola ; E. Delcher) sur le secteur du Gîte du Volcan, proche de la caldeira de l'Enclos Fouqué et grâce au financement attribué par le SNOV-TS, une station permanente de mesure de CO₂ en champ proche a pu être installée en août 2018 (GITN-

Gîte du Volcan). Des points de contrôle et d'échantillonnages sont aussi suivis périodiquement dans ce secteur proche du volcan.

Le réseau est donc constitué d'un pôle « distal » constitué des 3 stations permanentes PCRN, PNRN et BLEN, qui permet de suivre l'évolution temporelle de la concentration du CO₂ dans le sol sur le flanc ouest du volcan, à environ 14 km de distance du cône central, ainsi que d'un pôle « proximal », constitué par la station GITN, qui vise à suivre les transferts de magmas superficiels.

Les études menées en étroite collaboration avec le groupe de l'INGV de Palerme et dans le cadre de la thèse de G. Boudoire (2017) ont permis de définir des routines pour corriger l'influence des paramètres environnementaux sur le signal géochimique, afin de pouvoir les intégrer aux routines de surveillance de l'OVPF et de les corrélérer aux séries géophysiques. Ces routines sont en cours d'actualisation dans le cadre du post-doctorat de Bhavani Bénard.

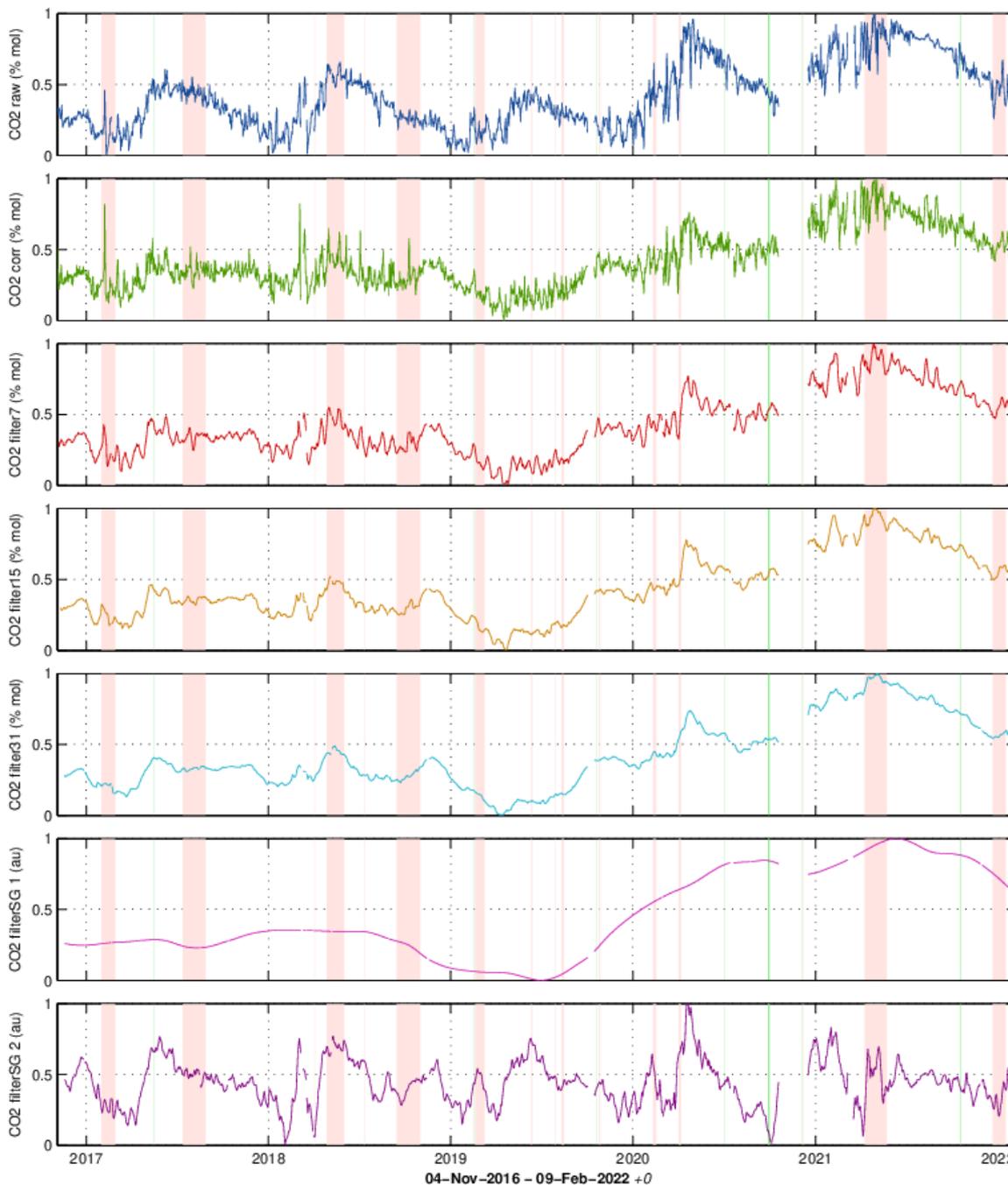
D'une façon générale, les concentrations moyennes en CO₂ diminuent du site le plus distal (BLEN : jusqu'à 2,5% CO₂) aux sites plus proches (PCRN, puis GITN : jusqu'à 1,3%). La station distale PNRN, située sur le bord nord de la rift-zone N120, enregistre des valeurs très faibles (< 0,2%) typiques des émissions de fond avec une forte signature organique.

Une nette augmentation des émissions en CO₂ sol est mesurée sur l'ensemble du pôle distal depuis mi-2019 qui traduit 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 (qui a eu une longue durée) (Figures 40, 41). Depuis cette éruption d'avril 2021, cette tendance s'inverse (diminution des émissions de CO₂), suggérant la vidange des réservoirs profonds par le transfert des magmas vers des niveaux crustaux moins profonds.



ALLDISTAL: "All distal CO2 stations" (All data)

© (c) OVPF-IPGP, 2022



Last data:
09-Feb-2022 +0
(min|avr|max)

- 1. CO2 raw = +0.380216 % mol (+0 | +0.42184 | +1)
- 2. CO2 corr = +0.432799 % mol (+0 | +0.41538 | +1)
- 3. CO2 filter7 = NaN % mol (+0.010606 | +0.41972 | +1)
- 4. CO2 filter15 = NaN % mol (+0.00015533 | +0.43296 | +1)
- 5. CO2 filter31 = NaN % mol (+0.00080635 | +0.41989 | +1)
- 6. CO2 filterSG 1 = NaN au (+1.6174e-05 | +0.44648 | +1)
- 7. CO2 filterSG 2 = NaN au (+0.0036479 | +0.44041 | +1)

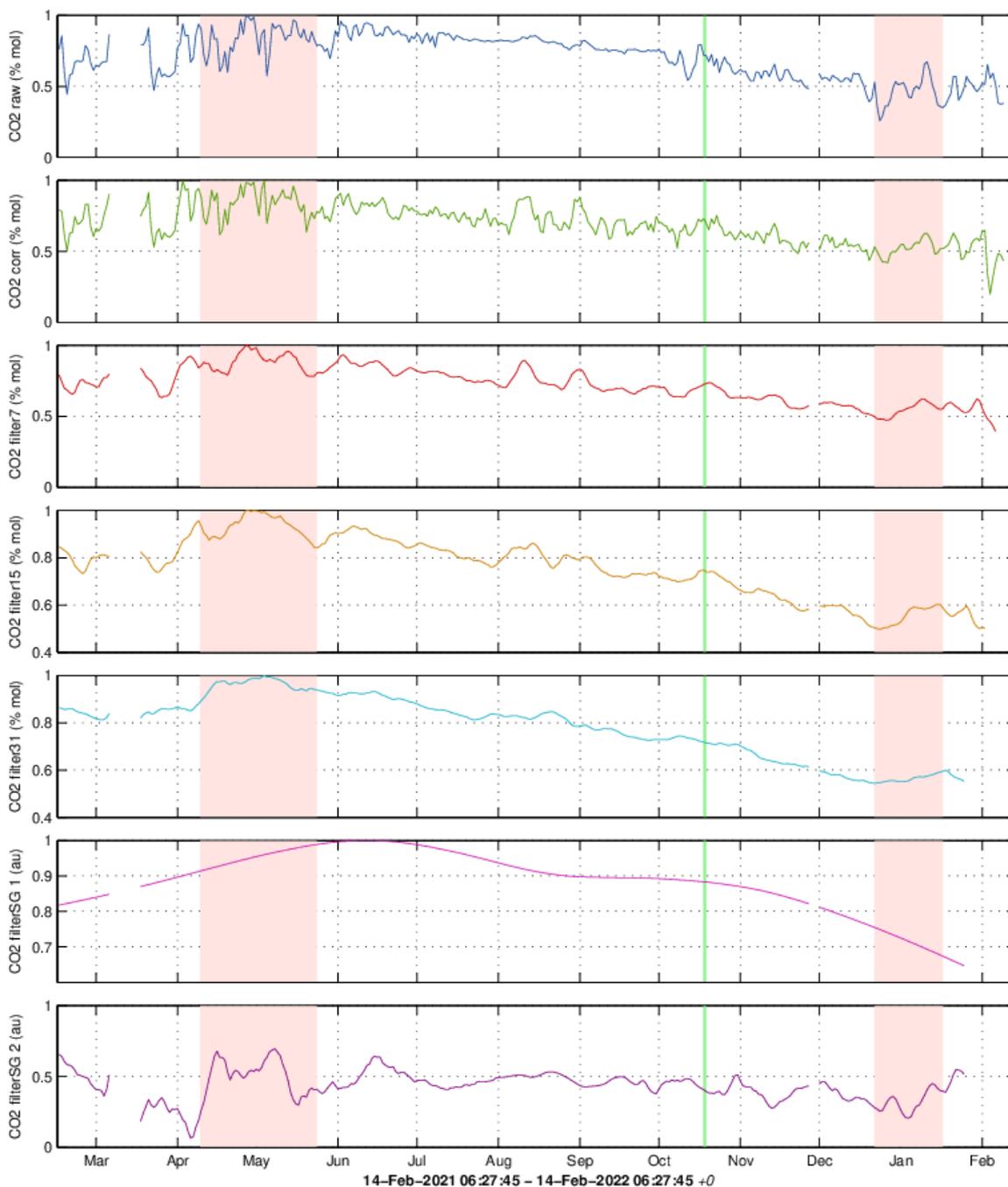
PROC.CO2 / resall_all - sysop@pitondescalumets - 14-Feb-2022 06:58:26 +0 - genplot.m (2021-01-01) / WebObs project (Beauducel et al., 2001-2022)

Figure 40 : Évolution temporelle moyenne des concentrations molaires en CO₂ 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). On remarquera la forte augmentation enregistrée par l'ensemble du réseau depuis 2019. Barres orange : éruptions. Barre verte : intrusions.



ALLDISTAL: "All distal CO2 stations" (1 year)

© (c) OVPF-IPGP, 2022



Last data:
09-Feb-2022 +0
(min|avr|max)

- 1. CO2 raw = +0.380216 % mol (+0.25682 | +0.70798 | +1)
- 2. CO2 corr = +0.432799 % mol (+0.19813 | +0.69159 | +1)
- 3. CO2 filter7 = NaN % mol (+0.39524 | +0.72241 | +1)
- 4. CO2 filter15 = NaN % mol (+0.49715 | +0.75894 | +1)
- 5. CO2 filter31 = NaN % mol (+0.54339 | +0.78393 | +1)
- 6. CO2 filterSG 1 = NaN au (+0.64683 | +0.88646 | +1)
- 7. CO2 filterSG 2 = NaN au (+0.065209 | +0.43446 | +0.69498)

PROC.CO2 / rcsall_01y - sysop@pitondescalumets - 14-Feb-2022 06:27:45 +0 - genplot.m (2021-01-01) / WebObs project (Beauducel et al., 2001-2022)

Figure 41 : Évolution temporelle moyenne des concentrations molaires en CO₂ dans le sol (valeurs brutes horaires et données filtrées) en 2021 sur les sites BLEN, PCRN et PNRN situés sur le flanc ouest du volcan (secteur distal). On remarquera la forte augmentation enregistrée sur ce secteur en lien avec l'éruption d'avril 2021. Barres orange : éruptions. Barre verte : intrusion d'octobre 2021.

En termes de fluctuations de second ordre de courte durée (Figure 41) :

- Une augmentation a été enregistrée entre le 6 et le 16 avril 2021. Sur les sites proximaux, l'augmentation a été continue jusqu'à début mai, annonçant le début de l'éruption de longue durée du 9 avril-24 mai 2021. Une forte baisse a ensuite été enregistrée au début de l'éruption.
- A partir du 7 juin 2021 une phase d'augmentation de courte durée a débuté à la fois en champ lointain et dans une moindre mesure en champ proche.
- Entre mi-juillet et fin septembre, les flux de CO₂ en champ distant sont restés relativement stables sur des valeurs élevées à intermédiaires.
- Au cours de la période septembre-décembre 2021, les émissions ont eu tendance à diminuer progressivement, annonciatrices d'un éventuel transfert de magma vers des niveaux crustaux peu profonds et en accord avec l'intrusion magmatique peu profonde du 18 octobre 2021 et l'éruption du 22 décembre 2021.
- L'éruption du 22 décembre 2021 marque une inversion de tendance, à savoir une augmentation des concentrations en CO₂ sur les stations distales mais aussi une augmentation rapide et sans précédent des émissions de CO₂ dans le sol sur la station proximale GITN.

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 (¹³C/¹²C) afin d'identifier et de quantifier de possibles apports en fluides magmatiques (Figure 42).

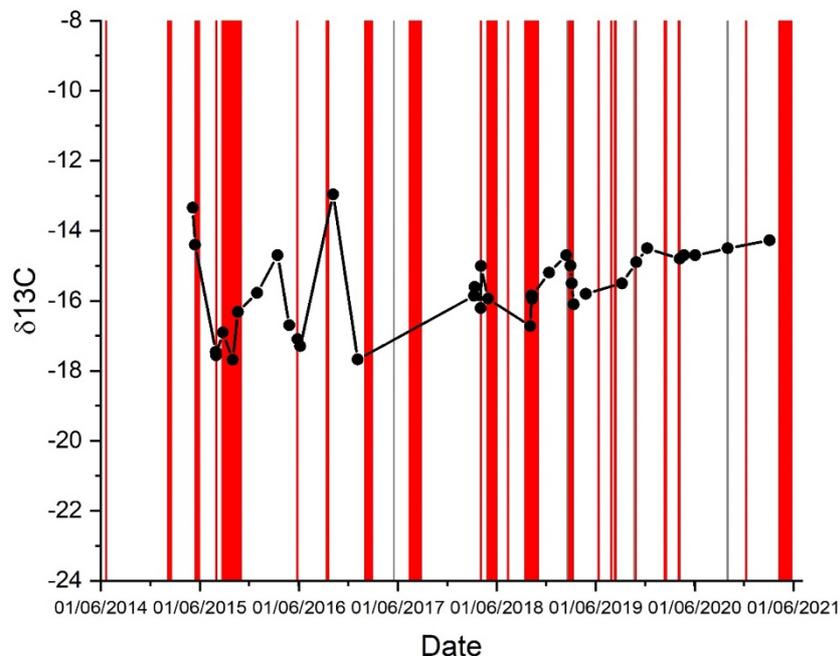


Figure 42 : Évolution temporelle de la signature isotopique du carbone du CO₂ dans le sol (0,5 m de profondeur) mesurée sur le point d'anomalie principal (P0) situé le long du profil de contrôle du Gîte, à 4 km du cône central. Les phases présentant des valeurs moins négatives indiquent une augmentation de la proportion de fluides d'origine magmatique dans les émissions diffuses par le sol.

Les données isotopiques montrent, après les fortes et rapides variations de la période 2014-2017, une plus faible variabilité sur la période suivante qui se traduit par une augmentation lente et régulière de la quantité moyenne de fluides d'origine magmatiques dans les émissions par le sol depuis 2018. 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.

5 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-Réunion) pour la caractérisation des émissions de fluides au niveau du Piton des Neiges (sources thermales ; émissions par le sol).

Des études exploratoires, menées à la fois sur les flancs du Piton de la Fournaise et sur le massif du Piton des Neiges ont permis de tester une large palette de méthodes d'échantillonnage et d'analyse et de définir la meilleure stratégie pour un suivi régulier de ces émissions dans le cadre de la surveillance de l'activité sismo-volcanique de La Réunion.

Un suivi régulier a donc été mis en place depuis juin 2016 de la composition chimique et isotopique du bullage associé aux trois sources thermales de l'établissement de Cilaos : Irénée, Véronique et Manès (Figure 43).



Figure 43 : 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 CO₂, avec des traces d'autres espèces tels le méthane et les gaz rares (He, Ar, Ne...).

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. CH₄/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 (³He/⁴He, exprimé sous forme de rapport, par rapport à l'atmosphère R/Ra ; Figure 44).

Dans les zones magmatiques et volcaniques actives, l'augmentation des proportions relatives en ³He 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 CO₂ 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-longue durée, suggère une tendance générale à l'augmentation du rapport R/Ra, entrecoupée de variations rapides (Figure 44). 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 CO₂ par le sol sur le flanc du volcan et participe à démontrer qu'une nouvelle phase majeure d'alimentation du système profond est en cours.

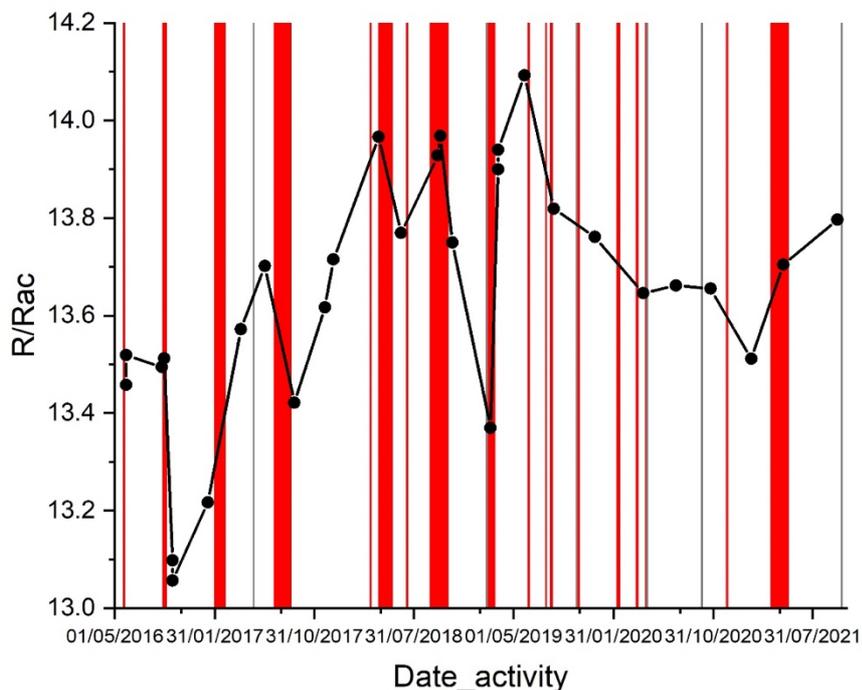


Figure 44 : Évolution temporelle de la signature isotopique de l'hélium (³He/⁴He, normalisé à l'air, R/Ra) dans la fraction gazeuse des sources thermales de Cilaos (source Irénée) au sein des anciens thermes de Cilaos.

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 qu'une alimentation magmatique profonde a lieu

actuellement, observable à l'échelle de l'île de La Réunion. Elle serait à l'origine de l'augmentation des durées d'éruptions, des volumes émis en surface et de leur explosivité depuis avril 2020.

6 Composition des produits solides des éruptions du Piton de la Fournaise en 2021

Les prélèvements de lave effectués sur site éruptif par les équipes de l'OVPF-IPGP sont analysés à l'IPGP et à l'Observatoire de Physique du Globe de Clermont Ferrand (OPGC-LMV).

Composition des laves de l'éruption du 9 avril – 24 mai 2021

Le 11 avril 2021, des échantillons pyroclastiques émis par les fontaines de lave avaient été échantillonnés à proximité du cône principal ainsi que les laves en aval de la fissure éruptive.

Les dépôts pyroclastiques des fontaines de lave sont entièrement constitués de ponces de type « golden ». Cette variété de ponce est caractérisée par des vésicules millimétriques organisées autour de grandes vésicules centrales centimétriques (Figure 45). Leur vésicularité atteint des valeurs très élevées jusqu'à 86% en volume avec 10 à 20% de vésicules isolées (non connectées entre elles).



Figure 45 : Lapilli de ponces de type « golden » émis par les fontaines de lave le 11 avril 2021 avec peu de particules fines formées par des grains légèrement allongés et de rares cheveux de Pelé.

L'analyse minéralogique indique la présence, en ordre décroissant de plagioclase, pyroxène et olivine. La proportion d'olivine est plus faible dans les coulées et plus importante dans les projections. L'abondance en plagioclase et pyroxène traduit des températures dans l'ensemble relativement faibles et une nature globalement évoluée des magmas émis.

Les laves sont riches en microcristaux (44 %, Figure 46) alors que les produits pyroclastiques sont beaucoup plus vitreux (quelques pourcents de microcristaux). L'imagerie électronique confirme les proportions très

importantes de plagioclase et clinopyroxène par rapport à l'olivine, en particulier dans les laves. Les cristaux millimétriques (phénocristaux) sont rares et observés uniquement dans les laves.

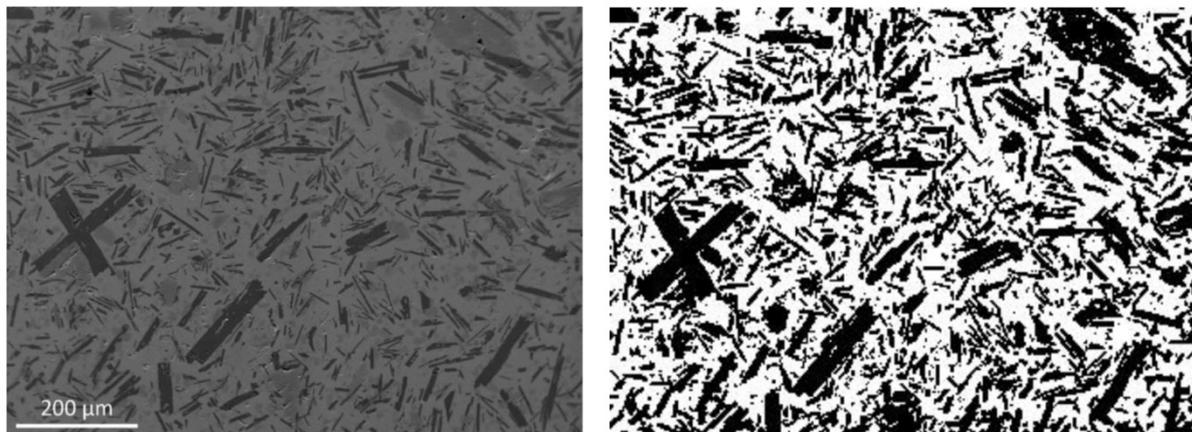


Figure 46 : Images en électrons rétrodiffusés de la texture d'un échantillon de lave trempée (REU 210411-1). En gris foncé : plagioclase ; gris intermédiaire : olivine + pyroxène ; gris clair : verre ; à droite, version de l'image analysée pour le décompte des pourcentages de cristaux (44 % de cristaux, 56 % de verre).

Les résultats montrent que les laves émises pendant la première partie de l'activité débutée le 9 avril ont une densité et un degré de cristallisation élevés et ont une composition chimique assez différenciée. L'analyse des projections indique une température du magma à l'évent d'environ 1155°C. L'analyse chimique et les propriétés physiques suggèrent que le premier magma émis correspond au refroidissement, dégazage et différenciation des magmas plus primitifs et plus chauds mis en place au début de l'année 2020. Ce magma « ancien » a pu être pressurisé et expulsé par la remontée du nouveau magma plus profond et chaud qui n'avait pas encore atteint la surface avant le 11/04/2021.

Composition des laves de l'éruption du 22 décembre 2021 – 19 janvier 2022

L'éruption débutée le 22/12/2021 a été caractérisée depuis le début par une activité de fontaine de lave de hauteur fluctuante (15-30 m) et une effusion de lave plutôt dense. Quatre fissures éruptives ont été observées le premier jour, situées sur le flanc sud à la base du cône terminal, au sud-est du Piton Kalla et Pélé et au sud-ouest du cratère Château Fort. A partir de la soirée du 22, l'activité s'est focalisée sur une seule des fissures éruptives, celle la plus en aval (aux alentours de 2030 m d'altitude), où un cône a commencé sa formation (Figure 47b) et a duré jusqu'à la fin (Figure 47c). Les échantillons pyroclastiques ont été échantillonnés à proximité du cône principal, ainsi que les laves en aval de la fissure éruptive (Figure 47, Tableau 6).



Figure 47 : a) Construction du cône et activité effusive du 23/12/2021 à 9h00 (OVPF-IPGP), b) zoom du cône ; c) cône le dernier jour de l'éruption.

L'OVPF a collecté trois fragments de laves (Tableau 6, Figure 48) émises par le cône principal et en aval de l'évent principal, en trempant l'un de ces fragments dans l'eau (Reu211224_1, qui préserve la texture primitive de la lave, Figure 48). Un dépôt massif de scories a également été échantillonné au niveau du cône éruptif (Tableau 6). Sur le flanc sud du cône principal, l'équipe a collecté des scories oxydées provenant de l'activité du lac de lave au sein du cône ainsi que des ponces dorées qui étaient présentes au sommet des scories. Le dépôt de retombées mis en place tout au long de la durée de l'éruption a été pelleté en tant que dépôt en vrac (Tableau 6).

Code	Occured	Collected	Material	Texture/Size	Note on location	Latitude	Longitude	Elevation (m)
REU211223-1	22/12/2021	23/12/2021	lava	dense	near main vent; 05:30 TU	21° 15' 49.9"	55° 42' 23.40"	2030
REU211223-2	22/12/2021	23/12/2021	bulk scoria	vesicular	near main vent; 05:30 TU	21° 15' 49.9"	55° 42' 23.40"	2030
REU211224-1	24/12/2021	24/12/2021	quenched lava	vesicular	downstream main vent; 11:00 TU	21° 15' 53.61"	55° 42' 23.53"	2074
REU220104-1	04/01/2022	04/01/2022	lava crust	dense	downstream main vent; 09:30 TU	21° 16' 01.0"	55° 42' 22.9"	2057
REU220119-1	15-16/01/2022	19/01/2022	scoria/bomb	dense	southern flank of the main cone	21° 15' 49.9"	55° 42' 23.40"	2030
REU220119-2	15-16/01/2022	19/01/2022	fluidal scoria	vesicular	southern flank of the main cone	21° 15' 49.9"	55° 42' 23.40"	2030
REU220119-3	15-16/01/2022	19/01/2022	golden pumice	vesicular	southern flank of the main cone	21° 15' 49.9"	55° 42' 23.40"	2030
REU220119-4	before 16/01/2022	19/01/2022	scoria fall	vesicular	southern flank of the main cone	21° 15' 49.9"	55° 42' 23.40"	2030

Tableau 6 : Échantillons analysés.

Analyses effectuées : Granulométrie, composition, densité, porosité, connectivité, XRD (minéralogie), XRF (éléments majeurs) et EPMA (micro-analyse verres et cristaux).

Bilan analyses physiques et texturales des laves et pyroclastes :

Les trois laves échantillonnées (Figure 48) sont denses avec des valeurs de vésicularité allant d'un minimum de 30 à un maximum de 50 % de vésiculation (Tableau 7 et Figure 49). Il convient de noter qu'une fois de plus les valeurs les plus basses de vésicularité ont été mesurées dans les laves trempées, où jusqu'à 8 % de vésicules isolées ont également été trouvées (pourcentage égal à la valeur trouvée dans les laves trempées de l'éruption d'avril 2021).



Figure 48 : Fragments de laves échantillonnées.

La fraction pyroclastique (Figure 50) montre une vésicularité plus élevée que les laves (Tableau 7) avec les scories fluidales ayant les valeurs les plus faibles (de 31 à 77 %) et les valeurs les plus élevées de vésicules isolées (jusqu'à 83 %, en accord avec le refroidissement dans la fontaine de lave). Viennent ensuite les scories très vésiculées avec des valeurs de 78 à 83 %, mais un faible nombre de vésicules isolées, en accord avec leur refroidissement dans l'air. Enfin, les ponces dorées représentent, comme à l'accoutumée, la portion la plus vésiculée (de 78 à 89 %) avec des valeurs non négligeables de vésicules isolées (jusqu'à 19 %).

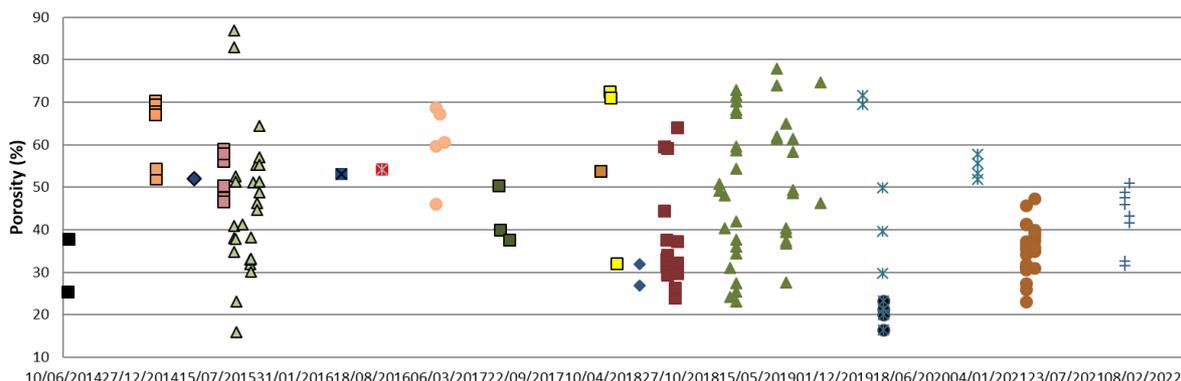


Figure 49 : Variation de la porosité des échantillons de lave collectés depuis 2014.

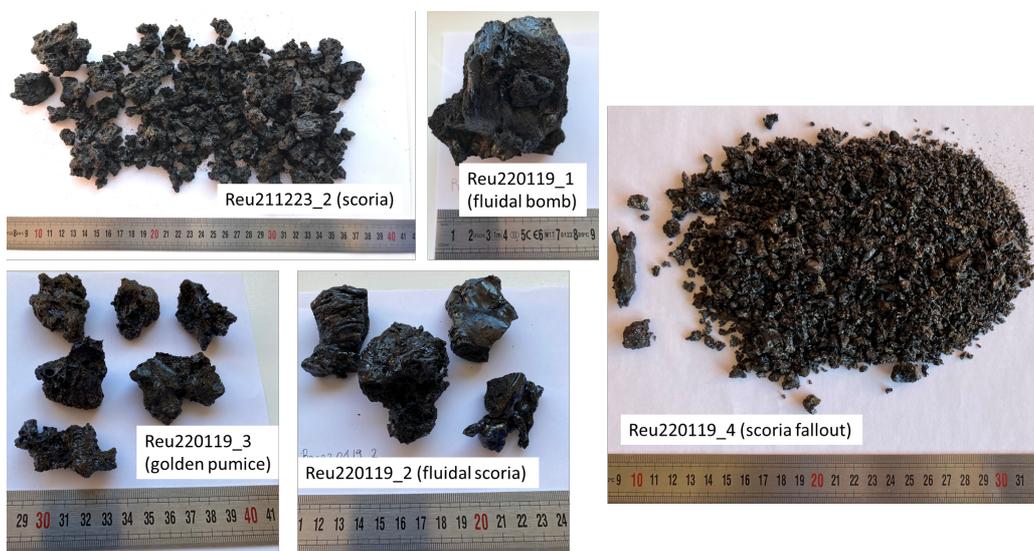


Figure 50 : Pyroclastes échantillonnés.

Sample	Type	Wt (gr)	Volume	Density	SD	Porosity	Connectivity
		(gr)	(cm ³)	gr/cm ³	gr/cm ³	(%)	(%)
Ren211223_1a	Lava	15,046	10,202	1,475	0,008	48,795	100
Ren211223_1b	Lava	16,259	10,438	1,558	0,001	45,917	100
Ren211223_1c	lava	9,508	6,301	1,509	0,002	47,608	100
Ren211224_1a	Quenched lava	22,763	11,555	1,970	0,002	31,601	95
Reu211224_1b	Quenched lava	17,487	9,014	1,940	0,004	32,646	92
Reu220104_1a	Lava	25,043	14,903	1,680	0,003	41,653	100
Reu220104_1b	Lava	14,412	8,808	1,636	0,002	43,191	100
Ren220104_1c	lava	11,837	8,369	1,415	0,013	50,885	100
Reu211223_2_1	scoria	5,281	8,442	0,626	0,004	78,278	97
Ren211223_2a	scoria	1,888	3,927	0,481	0,003	83,309	96
Ren211223_2b	scoria	4,676	8,137	0,575	0,002	80,049	93
Ren220119_2_1	fluidale	12,980	10,184	1,275	0,001	55,747	76
Ren220119_2_2	fluidale	9,246	7,602	1,216	0,002	57,774	77
Reu220119_2_3a	fluidale	1,794	0,902	1,990	0,064	30,889	17
Reu220119_2_3b	fluidale	4,015	3,402	1,180	0,003	59,021	75
Reu220119_2_3c	fluidale	10,129	6,811	1,487	0,001	48,365	56
Reu220119_3_1	golden	1,902	6,242	0,305	0,003	89,424	93
Ren220119_3_2	golden	3,017	4,828	0,625	0,002	78,302	81
Ren220119_3_3	golden	1,205	3,203	0,376	0,002	86,941	86
Reu220119_3_4	golden	1,280	3,125	0,410	0,001	85,781	87
Ren220119_4a	fluidale	3,109	2,202	1,412	0,011	50,965	64
Ren220119_4b	fluidale	1,248	1,956	0,638	0,003	77,851	97

Tableau 7 : Données de densité et de porosité des laves et des pyroclastes émis en 2021-2022 (Wt = poids; SD = écart type).

Deux analyses granulométriques ont été réalisées. La première analyse a été utile pour montrer la granulométrie moyenne des scories échantillonnées le 23 décembre. La nature plutôt grossière de ces lapilli/bombes ressort de la distribution granulométrique (Figure 51a). La courbe granulométrique du dépôt de retombée est cohérente avec une distribution log normale centrée sur un mode à phi -1.5 (entre 4 et 2,8 mm en diamètre) formée principalement de lapillis scoriacés fins et de cendres grossières allongées. La courbe est très similaire à la retombée de la fontaine de lave émise en avril 2020 (Figure 51c)

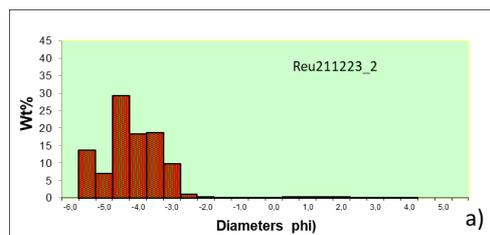
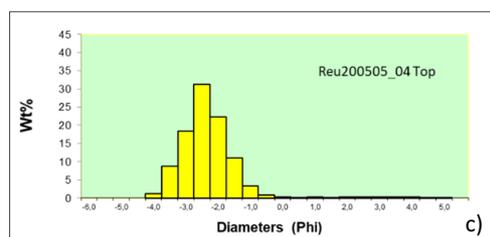
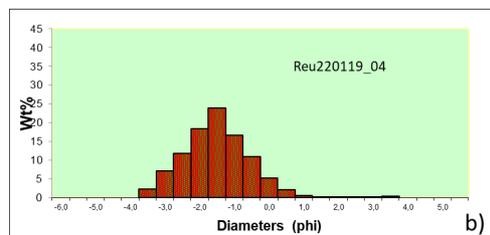


Figure 51 : a) Distribution granulométrique des fragments de scories échantillonnés le 23 décembre ; b) Distributions granulométriques de la base et du sommet des dépôts de retombée de la fontaine de lave de janvier 2022 ; c) et distribution granulométrique du sommet du dépôt de fontaine d'avril 2020 (en jaune).



Analyses roches totales des éléments majeurs, éruption du 22/12/2021 au 19/01/2022

Méthode : les concentrations en éléments majeurs ont été analysées à l'IPGP avec un XRF Epsilon 3xl (Malvern-Panalytical) suivant la procédure de routine (fusion alcaline, mesure par XRF). On remarque que les laves émises vers la fin de l'éruption sont moins différenciées (plus riches en MgO et moins riches en K₂O) que les laves émises au début de l'éruption.

	211223_1	211224_1	220104_1	220119_1	220119_2	220119_3
SiO ₂	47,72	48,61	48,05	47,96	48,89	47,50
TiO ₂	2,69	2,74	2,67	2,64	2,66	2,59
Al ₂ O ₃	13,70	14,28	13,61	13,20	13,42	13,36
Fe ₂ O ₃	12,31	12,53	12,62	12,71	13,05	12,63
MgO	6,44	6,67	7,44	8,01	8,58	8,13
MnO	0,17	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18
CaO	11,11	11,27	10,97	10,88	10,97	10,68
Na ₂ O	1,92	1,89	1,86	1,87	1,98	1,71
K ₂ O	0,56	0,57	0,55	0,55	0,55	0,53
P ₂ O ₅	0,32	0,31	0,31	0,30	0,30	0,28
Total	96,94	99,05	98,25	98,30	100,58	97,60

Tableau 8 : Teneurs en éléments majeurs des laves émises lors de l'éruption (analyses XRF).

Concentration des éléments en traces, éruption du 22/12/2021 au 19/01/2022

Méthode : les concentrations en éléments en traces de 5 échantillons ont été analysées au LMV par ICP-MS suivant la procédure de routine (dissolution acide, mesure sur ICP-MS Agilent 7500, calibration BHVO-2).

échantillon	Date	Cr (ppm)	Ni (ppm)	La (ppm)	Sm (ppm)	Yb (ppm)	La/Sm
21 12 23 -1	22/12/2021	230	75	18.51	6.57	2.31	2.82
21 12 24 -1	24/12/2021	236	77	18.51	6.46	2.31	2.87
22 01 04 -1	04/01/2022	290	102	17.73	6.32	2.25	2.80
22 01 19 -1	10/01/2022	359	129	17.83	6.23	2.22	2.86
22 01 19 -2	10/01/2022	384	141	17.57	6.12	2.19	2.87
22 01 19 -3	10/01/2022	394	147	17.67	6.21	2.21	2.85

Tableau 9 : Concentration de quelques éléments en traces des laves émises lors de l'éruption (analyses ICP-MS).

Le premier échantillon (21 12 23 -1 émis le 22 décembre) est caractérisé par des teneurs relativement basses en Ni (75 ppm) et en Cr (230 ppm) témoignant de l'éruption d'un magma relativement différencié. Au cours de l'éruption, les teneurs en éléments compatibles (Ni et Cr) augmentent régulièrement, jusqu'à presque doubler en fin d'éruption, alors que les teneurs en éléments incompatibles (terres rares) diminuent. Cette tendance pourrait être attribuée à l'entraînement croissant de phénocristaux d'olivine, mais aucun phéno-cristal n'a été observé dans les produits émis en janvier 2022, donc l'hypothèse la plus probable est l'arrivée d'un magma moins différencié. Le rapport La/Sm traduisant l'enrichissement en éléments incompatibles dans la source des magmas montre des valeurs (2.80-2.87) proches à inférieures aux valeurs des éruptions de 2020 et 2021, et s'inscrit dans la tendance à la baisse initiée en 2019 (Figure 52).

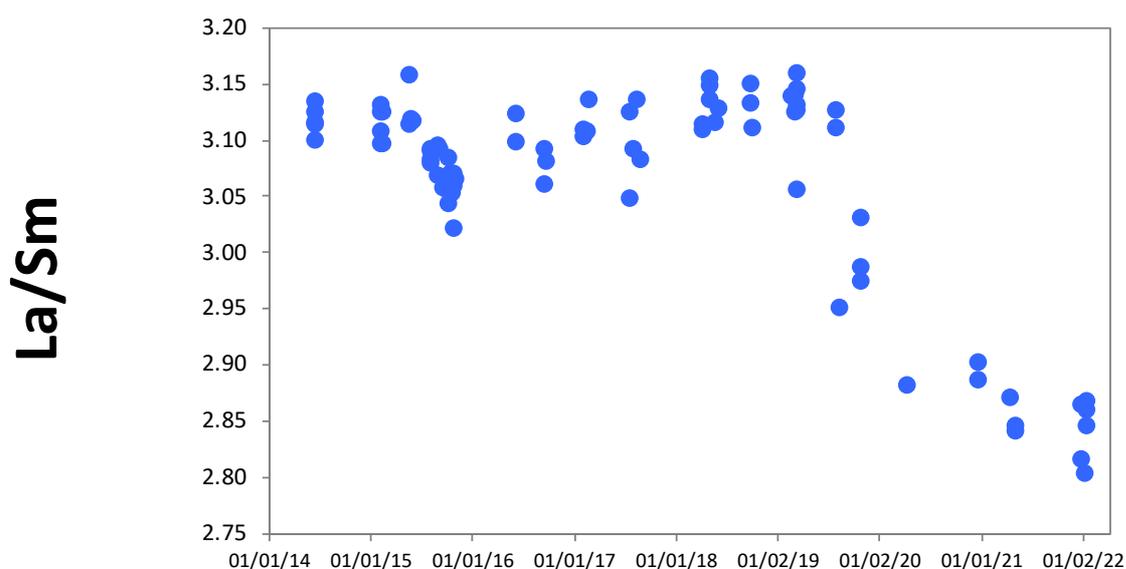


Figure 52 : Évolution du rapport La/Sm sur le cycle éruptif en cours depuis 2014.

Cette tendance à l'appauvrissement de la source des magmas est également enregistrée par plusieurs autres rapports d'éléments (e.g., Nb/Zr, La/Yb, etc). L'analyse des rapports isotopiques de Sr et Pb est en cours pour confirmer cette tendance.

Ces données indiquent que le volcan est alimenté depuis 2019 par une source de plus en plus réfractaire. Cette tendance est attribuée à la fin de « l'événement d'extraction de liquide depuis le manteau », qui est à l'origine du cycle éruptif initié en 2014. Autrement dit, du point de vue de l'alimentation profonde, l'activité du volcan début 2022 était toujours liée au cycle débuté en 2014. Les valeurs absolues des indicateurs d'enrichissement de la source (identiques aux valeurs les plus basses mesurées sur la période historique) suggèrent cependant que le cycle initié en 2014 serait proche de sa fin.

Analyses ponctuelles à la microsonde des produits de l'éruption du 22/12/2021 au 19/01/2022

Analyse détaillée de la composition des minéraux et des verres pour quatre échantillons couvrant différentes étapes de l'éruption : ponces du début de l'éruption (émises le 22 décembre 2021), lave trempée à l'eau du début de l'éruption (24 décembre 2021), lave cristallisée collectée le 4 janvier 2022 et ponces de la fin de l'éruption (émises le 15 ou le 16 janvier 2022). Microsonde électronique Cameca SxFive, LMV.

REU211223-2 : ponce très vésiculée (« golden pumice »)

Les échantillons pyroclastiques collectés le 23 décembre 2021 (émission probable le 22 décembre 2021) sont très vésiculés, avec plusieurs tailles de vésicules, et sont relativement riches en cristaux (plus que ceux échantillonnés en avril-mai 2021). Les microcristaux sont des plagioclases ($An_{62,3-72,6}$), des clinopyroxènes zonés ($Mg\#_{73,5-79,0}$) et des olivines ($Fo_{77,4-79,6}$). Quelques cristaux de plus grande taille (max. 400 μm) sont des clinopyroxènes ($Mg\#_{81,0-83,9}$) et des olivines ($Fo_{80,5-81,1}$) renfermant de rares inclusions de spinelle chromifère (30 % Cr_2O_3). Les verres interstitiels des pyroclastes sont assez évolués (5,61 % en masse de MgO , 0,83 % en masse de K_2O), et correspondent à une température magmatique d'environ 1140 °C (en considérant une composition anhydre et en utilisant le thermomètre de Rhéty et al. 2017). Ils sont similaires aux pyroclastes émis ces dernières années, mais plus riches en cristaux que ceux de l'éruption d'avril 2020, qui avait émis les magmas les plus chauds et primitifs de ces dernières années.

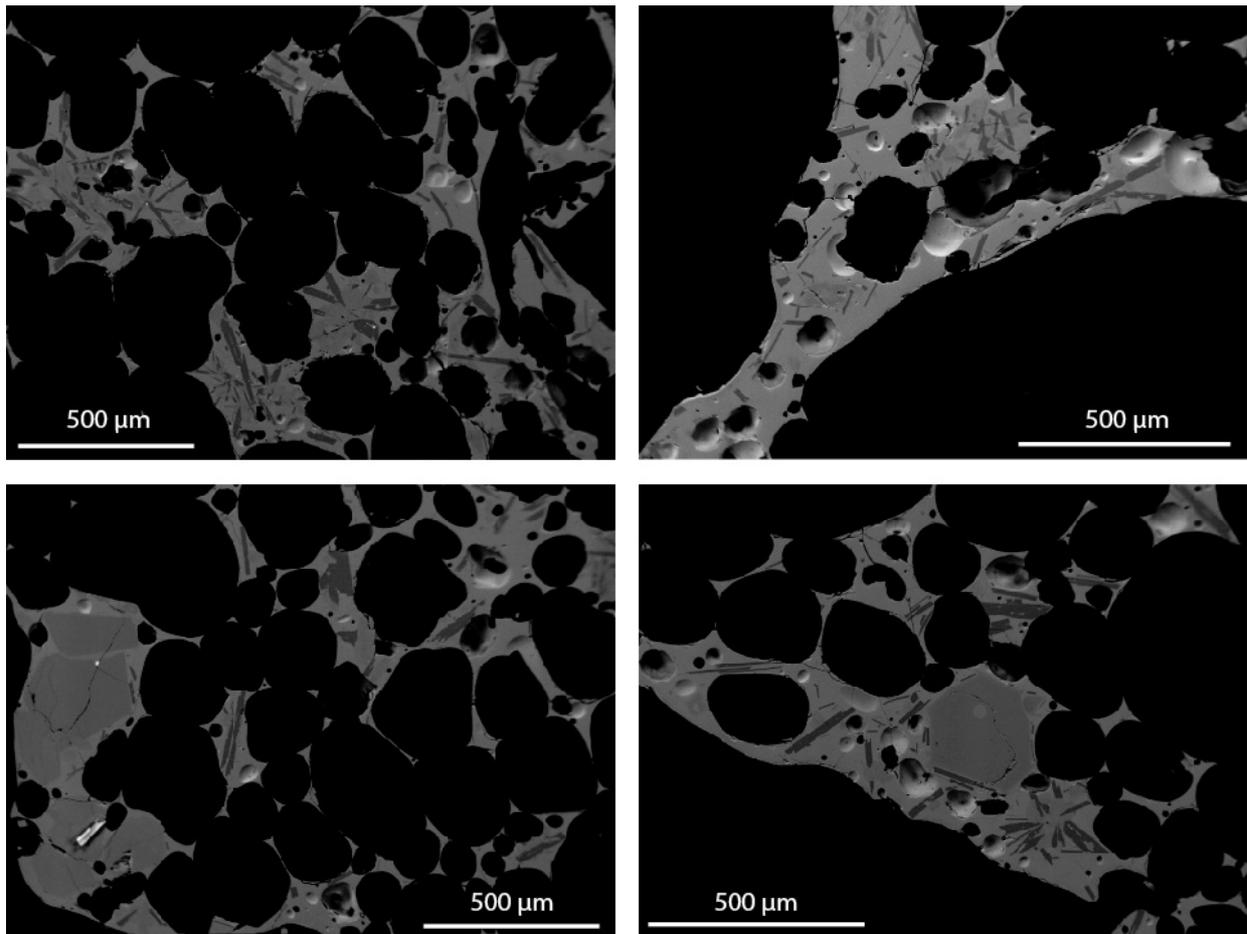


Figure 53 : Textures de l'échantillon REU211223-2 imagées en électrons rétrodiffusés.

REU211224-1 : lave dense trempée

Échantillon très dense fortement dégazé, avec absence totale de vésicules, prélevé directement dans la coulée le 24 décembre 2021. Les laves sont riches en microcristaux de plagioclase ($An_{62,1-69,7}$), clinopyroxène ($Mg\#_{75,7-82,0}$) et olivine ($Fo_{70,3-79,8}$). Les zonages oscillatoires sont fréquents dans les clinopyroxènes, en particulier les plus gros. Certaines olivines montrent des textures squelettiques, avec des surcroissances dendritiques aux sommets. Quelques olivines de plus grande taille (Fo_{81} , maximum 300 μm) contiennent des inclusions de spinelle chromifère. Les verres interstitiels de l'échantillon de lave trempée sont assez évolués et très similaires à ceux des pyroclastes (5,73 % en masse de MgO , 0,87 % en masse de K_2O), et correspondent à une température magmatique d'environ 1144 °C (en considérant une composition anhydre et en utilisant le thermomètre de Rhéty et al. 2017). La proportion de cristaux est d'environ 30 %, plus faible que les 44 % mesurés sur la lave mise en place en avril 2021.

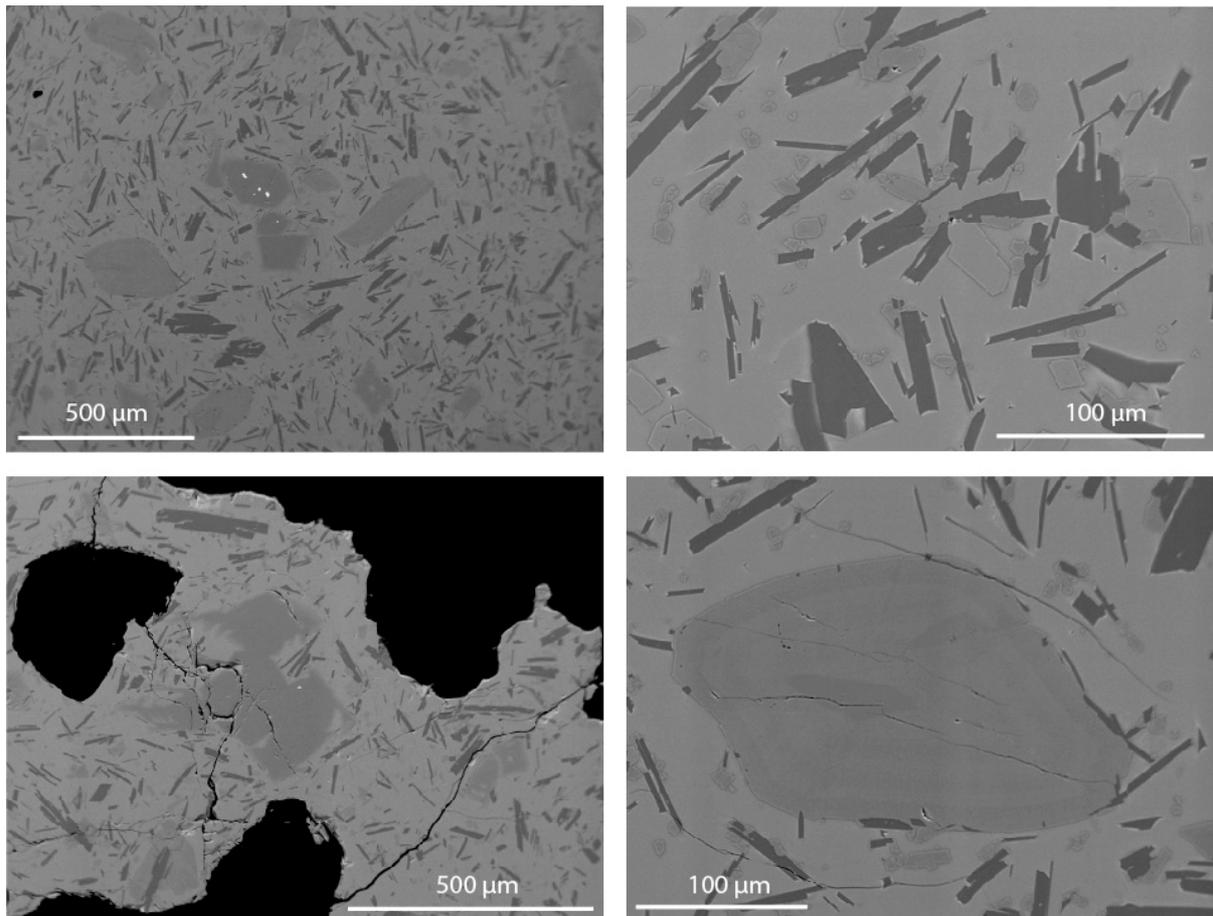


Figure 54 : Textures de l'échantillon REU211224-1 imagées en électrons rétrodiffusés.

REU220104-1 : lave non-trempee

Échantillon très dense et très cristallin, prélevé encore chaud mais non trempé le 4 janvier 2022, texture microlitique. Les microcristaux sont les mêmes que ceux des autres échantillons : plagioclase ($An_{57,7-68,9}$), clinopyroxène ($Mg\#_{74,7-81,1}$) et olivine ($Fo_{75,6-81,1}$), avec des zonations oscillatoires très nettes dans les clinopyroxènes. L'espace entre les cristaux est rempli de dendrites de clinopyroxène. Oxydation visible en surface (dendrites d'hématite probables). Présence de cristaux d'olivine de plus grande taille, en particulier un phénocrystal de grande taille (600 μm) à zonation normale ($Fo_{83,9-77,5}$) et inclusions de spinelle chromifère.

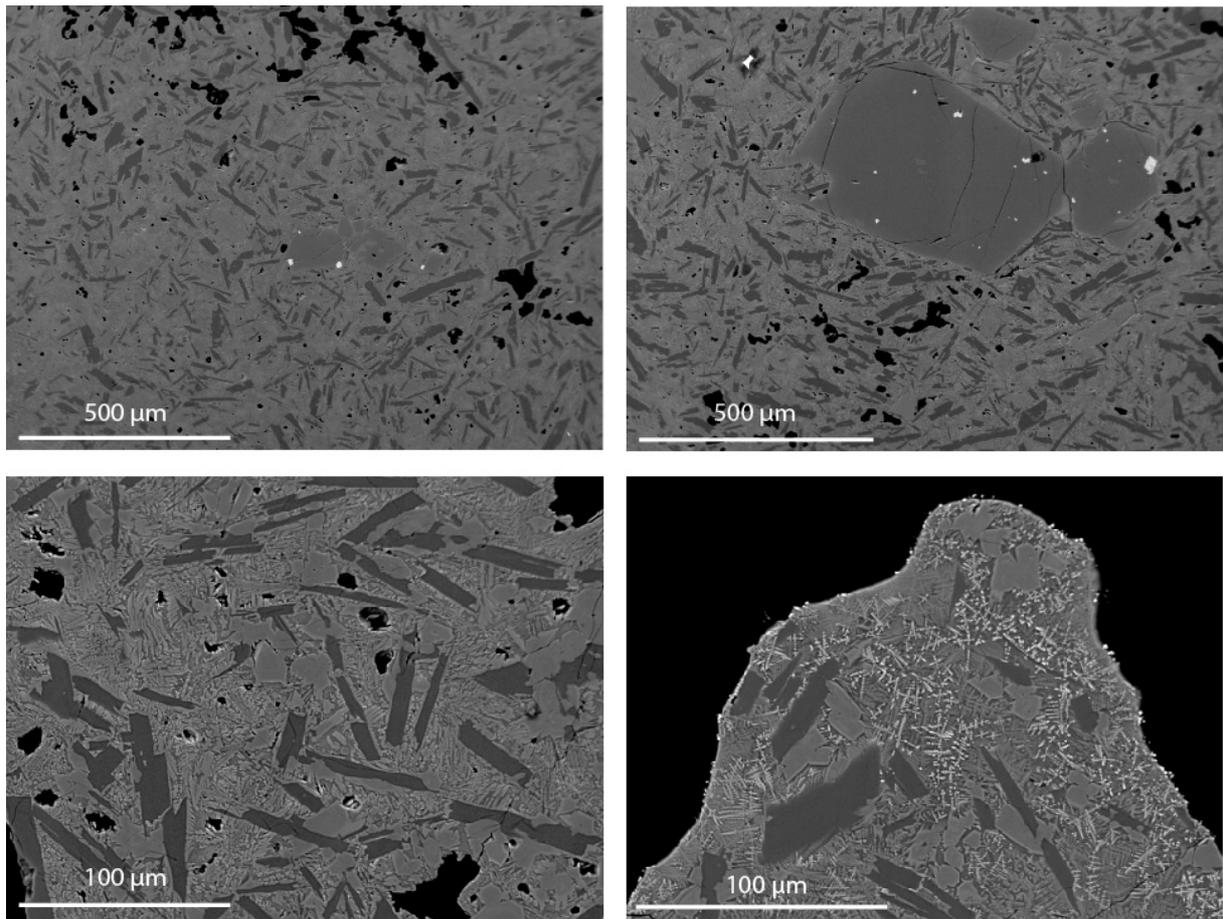


Figure 55 : Textures de l'échantillon REU220104-1 imagées en électrons rétrodiffusés.

REU220119-3 : ponce très vésiculée (« golden pumice »)

Les échantillons pyroclastiques collectés le 19 janvier 2022 correspondent à la phase finale de l'éruption, émis le 15 ou le 16 janvier 2022. L'échantillon REU220119-3 est situé stratigraphiquement au-dessus de scories oxydées associées aux débordements du lac de lave. Les échantillons sont très vésiculés, avec plusieurs tailles de vésicules, et sont moins riches en cristaux que ceux prélevés en début d'éruption. Les microcristaux sont des plagioclase ($An_{64,2-67,4}$), des clinopyroxènes zonés ($Mg\#_{75,6-79,6}$) et des olivines ($Fo_{77,9-78,4}$). Quelques cristaux d'olivine ($Fo_{80,8-82,7}$) sont de plus grande taille (max. 200 µm) et des olivines renfermant des inclusions de spinelle chromifère (34 % Cr_2O_3). Les verres interstitiels des pyroclastes sont nettement plus magnésiens que ceux du début de l'éruption (6,60 % en masse de MgO, 0,72 % en masse de K_2O), et correspondent à une température magmatique d'environ 1166 °C (en considérant une composition anhydre et en utilisant le thermomètre de Rhéty et al. 2017). Ceci correspond à une augmentation de 25 °C par rapport aux pyroclastes émis au début de l'éruption en décembre 2021, sans atteindre le niveau de l'éruption d'avril 2020.

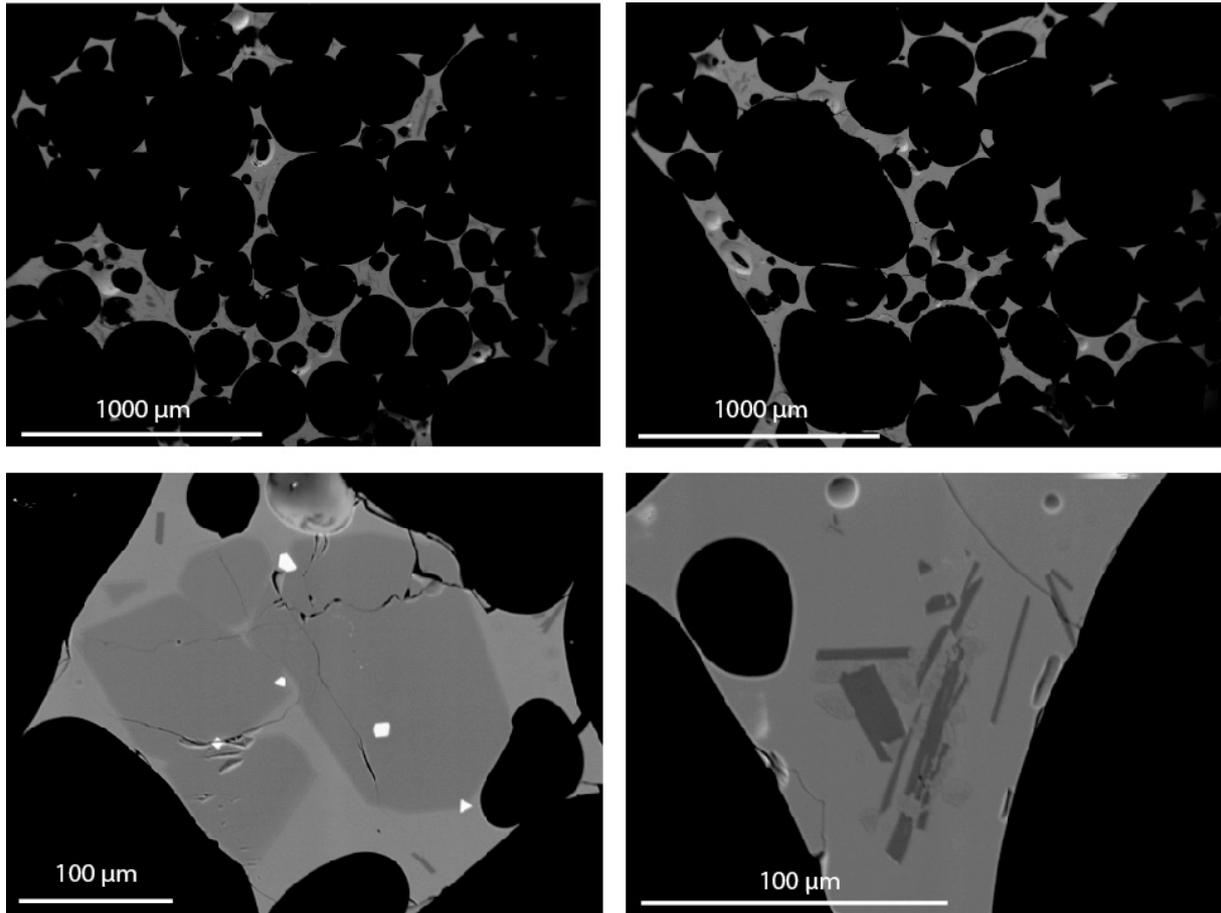


Figure 56 : Textures de l'échantillon REU220119-3 imagées en électrons rétrodiffusés.

En résumé, les échantillons sont très similaires à ceux de l'éruption d'avril 2021, mais montrent une évolution au cours de l'éruption, légèrement plus froids en début d'éruption, légèrement plus chauds en fin d'éruption. L'hypothèse initiale d'un refroidissement progressif d'un réservoir superficiel suite à une réinjection de magma chaud et riche en gaz à la fin de l'éruption d'avril 2020 n'explique pas l'augmentation de température en fin d'éruption, qui doit impliquer un magma un peu plus profond.

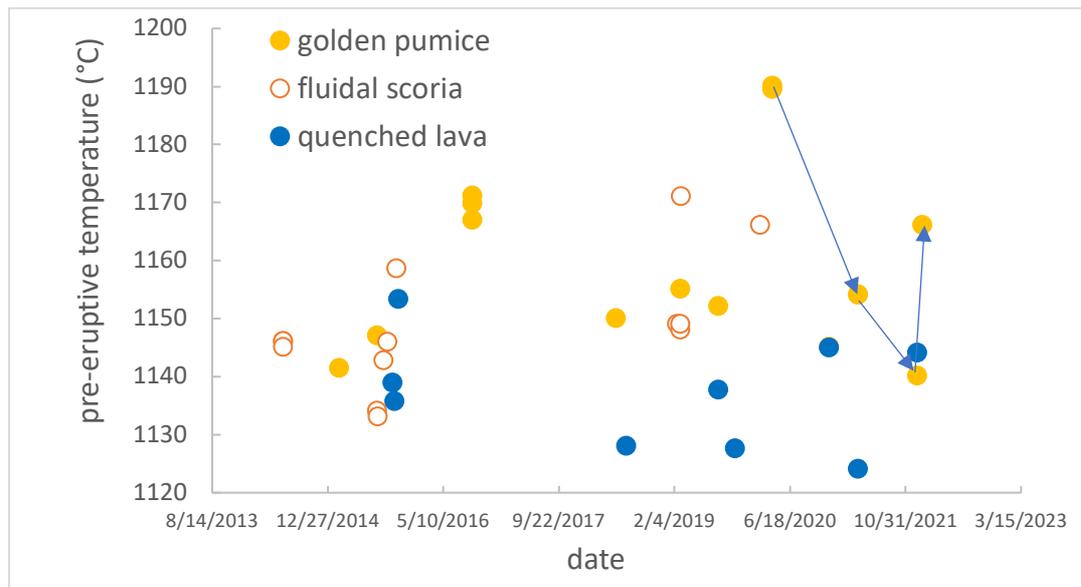


Figure 57 : Évolution des températures pré-éruptives (calculées à partir de la teneur en MgO des verres) depuis 2014.

Références :

Arellano, S. et al. (2021), Synoptic analysis of a decade of daily measurements of SO₂ emission in the troposphere from volcanoes of the global ground-based network for observation of volcanic and atmospheric change. *Earth System Science Data*, 13, 1167-1188.

Carn, S. A., V.E. Fioletov, C.A McLinden, C. Li, NA. Krotkov (2017), A decade of global volcanic SO₂ emissions measured from space. *Scientific reports*, 7(1), 1-12.

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

Liuzzo, M., A. Di Muro, G. Giudice, L. Michon, V. Ferrazzini, S. Gurrieri (2015), New evidence of CO₂ degassing anomalies on the Piton de la Fournaise volcano and the link with volcano tectonic structures *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 16, doi:10.1002/2015GC006032.

Verdurme, P., S. Carn, A.J.L. Harris, D. Coppola, A. Di Muro, S. Arellano, L. Gurioli (2022), Lava volume from remote sensing data: comparisons with reverse petrological approaches for three types of effusive eruptions, *Remote Sensing*, 14 (2) 323.

VII Imagerie et télédétection

1 L'InSAR (Interferometric Synthetic Aperture Radar)

- **Collaborations:** OI2/ISDEFORM – OSUL/OPGC/IPGP

En 2021, 480 images SAR ont été acquises sur le Piton de la Fournaise dans le cadre du Service d'Observation OI2 (120 S1 SM & IW, 28 PAZ SPT, 332 ALOS2 SPT). Ces données ont permis d'imager les déplacements du sol induits par les éruptions d'avril 2021 (Figures 58 et 59) et de décembre 2021 (Figure 61), ainsi que ceux induits par l'intrusion d'octobre 2021 (Figure 60).

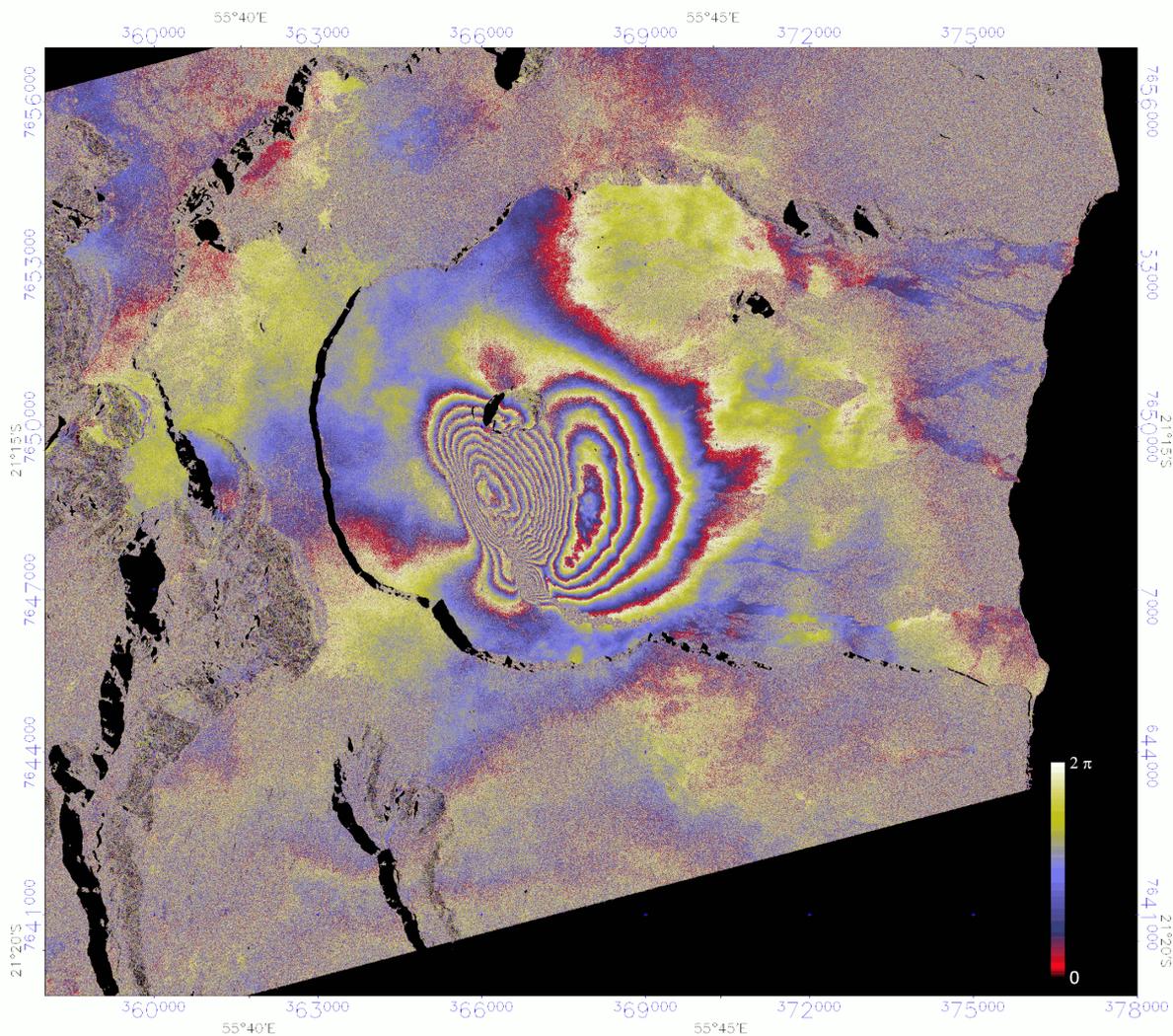


Figure 58 : Interférogramme ascendant Sentinel-1 Stripmap (S6, 26245_26420, 30/03/2021 - 11/04/2021) montrant les déplacements du sol liés à l'éruption d'avril 2021 au Piton de la Fournaise. Un cycle complet de phase (rouge-bleu-jaune) représente une augmentation de distance d'environ 2,8 cm entre la surface du sol et le satellite. Les coordonnées sont en kilomètres UTM (zone 40 Sud). L'interférogramme montre une superposition de deux motifs concentriques de franges sur le flanc sud-est du cône sommital du Piton de la Fournaise. Le maximum du premier motif, situé au sud du cratère Dolomieu correspond à un déplacement du sol d'environ 25 cm vers le satellite. Le maximum du deuxième motif, correspond à un déplacement du sol d'environ 12 cm s'éloignant du satellite. La zone incohérente, à la marge sud-est de la zone de déformation, correspond à la coulée de lave mise en place lors de l'éruption d'avril 2021. La direction de la ligne de visée du satellite va de l'Ouest-Sud-Ouest à l'Est-Nord-Est.

Le Service OI2 a aussi contribué au suivi de la mise en place de la coulée de lave émise pendant l'éruption d'avril 2021. Cette contribution a été particulièrement utile pendant cette longue éruption au cours de laquelle les conditions météorologiques ont été, à plusieurs reprises et pendant plusieurs jours d'affilée, défavorables aux observations de visu.

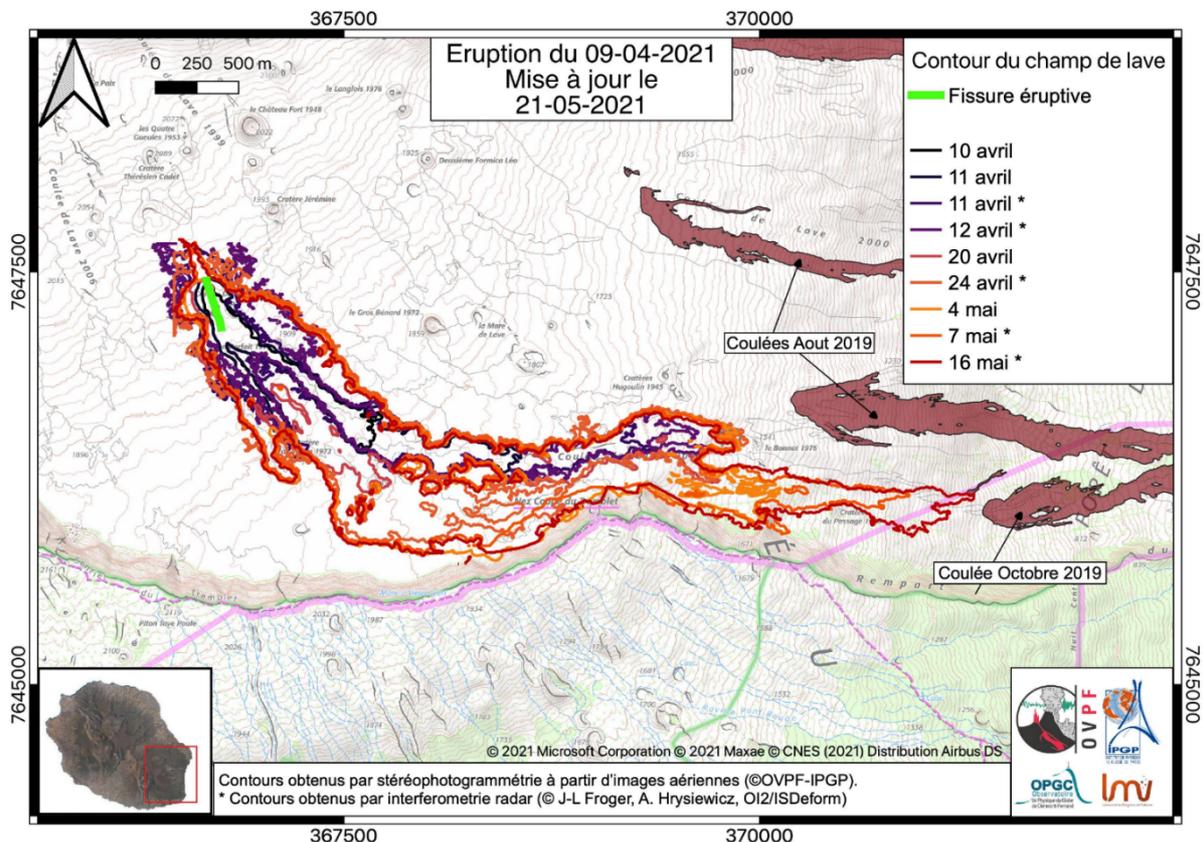


Figure 59 : Carte de l'évolution des contours de la coulée de lave associée à l'éruption du 9 avril – 24 mai 2021. Les contours avec astérisque ont été calculés à partir des données InSAR (Sentinel-1 pour les 11 et 12 avril et ALOS-2 Spotlight pour les 24 avril, 7 et 16 mai), les autres contours ont été obtenus à partir de données stéréo-photogrammétriques (acquisition par ULM ou drone).

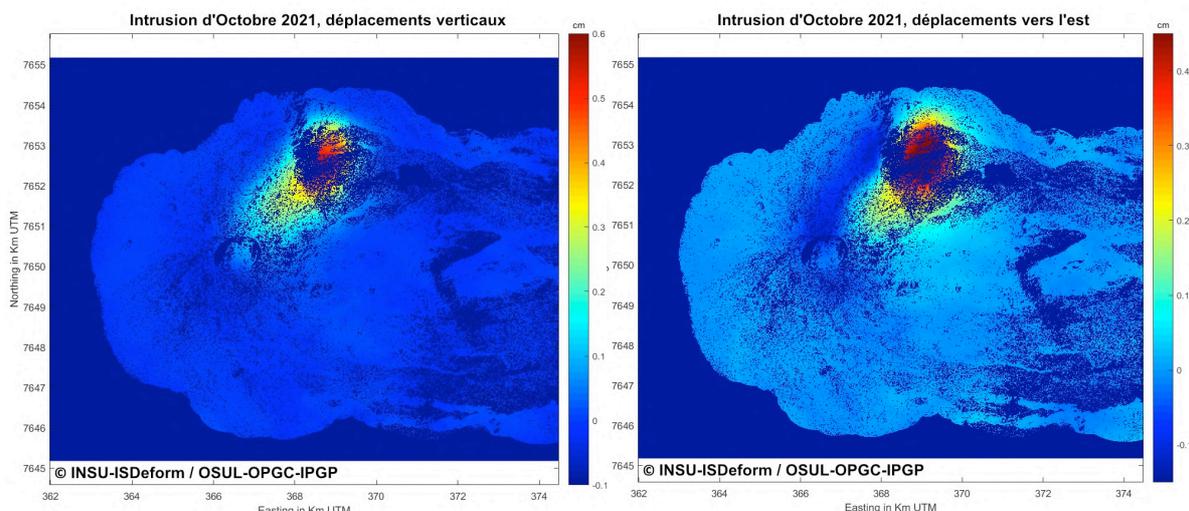


Figure 60 : Cartes des déplacements verticaux (à gauche) et vers l'est (à droite), déduites des données InSAR, liés à l'intrusion du 18 octobre 2021. L'intensité des déplacements est donnée par la barre colorée (©INSU-ISDeform / OSUL-OPGC-IPGP).

Le suivi InSAR de la dernière éruption de 2021 a été rendu difficile du fait de la conjonction de l'arrivée à expiration de plusieurs des projets dans le cadre desquels était assuré l'approvisionnement en données SAR du Service et de la défaillance du satellite Sentinel-1B qui assure habituellement les acquisitions S1 Stripmap sur le Piton de la Fournaise (Sentinel-1A assurant quant à lui les acquisitions en mode IW moins bien résolu que le Stripmap). Nous avons pu obtenir auprès de l'agence spatiale espagnole quelques acquisitions PAZ, mais ces données nous ont été fournies avec beaucoup de retard les rendant peu utiles pour la surveillance opérationnelle.

Il est à noter qu'à la date de rédaction de ce rapport, le satellite Sentinel-1B n'a toujours pas retrouvé ses pleines capacités de fonctionnement. La perte définitive des acquisitions Sentinel-1B sur le Piton de Fournaise serait significativement dommageable pour les activités du service OI2.

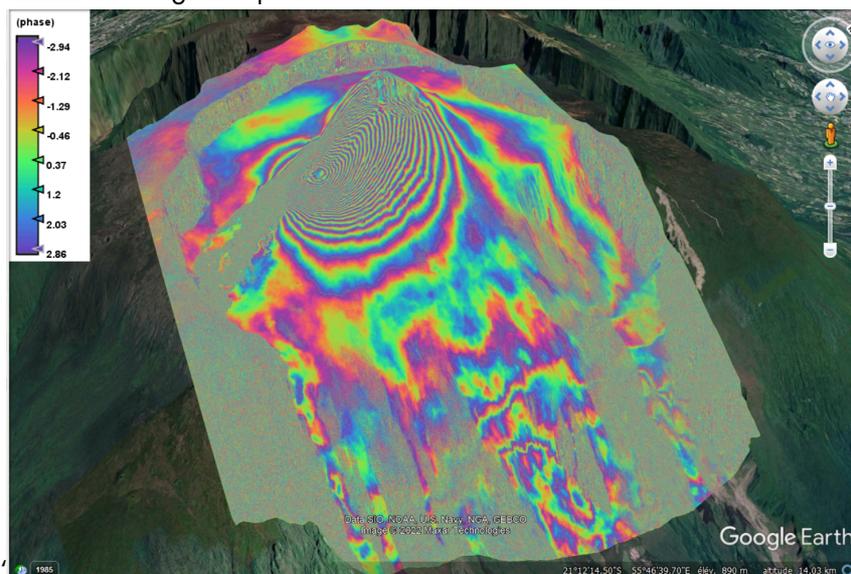


Figure 61 : Interférogramme (PAZ Spotlight interferogram - SPT 044, Dsc Right - 10/12/2021 – 23/01/2022) montrant les déplacements du sol liés à l'éruption du 22 décembre 2021 au Piton de la Fournaise.

Malgré la fin du projet « JAXA – ALOS2-RA6 » en mars 2021, nous avons pu récemment récupérer une quantité importante d'images ALOS2 acquises en mode Spotlight sur le Piton de la Fournaise au cours de l'année écoulée dans le cadre d'une collaboration avec l'ESTEC (ESA).

En 2021, deux projets ont été soumis en réponse aux Appels d'Offre « 3rd Research Announcement on the Earth Observations JAXA » et « Joint DLR-INTA Scientific Announcement of Opportunity ». Le premier projet a été évalué positivement et nous devrions pouvoir bénéficier à nouveau d'acquisitions ALOS2 Spotlight (et à terme d'acquisitions ALOS4) sur le Piton de la Fournaise très prochainement. Nous attendons les résultats de l'évaluation du second projet.

Références :

Dumont, Q., V. Cayol, J.L. Froger (2021), Mitigating bias in inversion of InSAR data resulting from radar viewing geometries. *GJI*, Volume 227, Issue 1, October 2021, Pages 483–495, <https://doi.org/10.1093/gji/ggab229>

2 L'optique

[Nous ne discutons ici que de l'éruption qui s'est déroulée dans son entièreté en 2021, à savoir l'éruption du 9 avril-24 mai 2021]

Le suivi stéréophotogrammétrique des coulées de lave et du sommet initiée de manière systématique depuis 2014 s'est poursuivi encore en 2021, avec comme toujours des acquisitions lors de campagnes stéréophotogrammétriques dédiées (avant, pendant et après l'éruption) en utilisant un appareil photographique à haute résolution acheté en 2018 (Canon 5DSR à 50 Mpix). L'appareil est associé à un GPS en mode naturel et des développements sont en cours pour installer un GPS différentiel.

En parallèle, des images à haute résolution ont été récupérées sur des sites internet. Depuis plusieurs années nous construisons une base de données en crowdsourcing avec l'accord des propriétaires des dites images. Cela a été également le cas pour 2021 qui a été marquée par une éruption ayant lieu pendant une période de mauvaises conditions météorologiques. Ainsi, le crowdsourcing permet de profiter de créneaux exploités soit par des professionnels de l'ULM soit par les services de la sécurité civile. Le grand public a plus tendance à filmer que photographier à haute cadence d'acquisition. Aussi, nous procédons préalablement aux calculs photogrammétriques à une extraction des images à une fréquence de 1 image par seconde dans les films 4K qui nous sont fournis. Dans ce cas le positionnement de la caméra n'est pas renseigné et il est nécessaire de densifier les points d'amer au sol par repiquage dans des régions non affectées par l'éruption sur d'autres modèles.

Depuis 2013 nous faisons dans le cadre du programme CNES/Kalidéos une acquisition annuelle de l'ensemble de l'Enclos Fouqué avec des images tri-stéréos du satellite pléiades. Depuis 2021 nous avons acquis une expertise dans la réalisation des MNS à partir de ces données et avons traité l'ensemble de la base de données. Malheureusement le MNS concernant l'éruption d'avril-mai 2021 est affecté par quelques nuages sur la coulée.

Pour cette éruption un volume de $11,4 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ a été calculé pour l'éruption à partir des images pléiades. Cependant, la présence de nuages sur les images a compromis les calculs sur 25 % de la surface de la coulée loin de l'événement mais sur une zone de replat (Figure 62). Des compléments ont été réalisés mais toujours avec des problèmes de nébulosité. D'autres calculs sont en cours pour améliorer la qualité de la restitution. La cartographie des contours a également été produite (Figure 62). Des modèles et cartes intermédiaires existent également.

Au total en 2021, ce sont 17 campagnes de photos qui ont été réalisées (Université de La Réunion/OVPF ou Crowdsourcing), 14 Orthophotos et une demi-douzaine de MNS qui ont été construits.

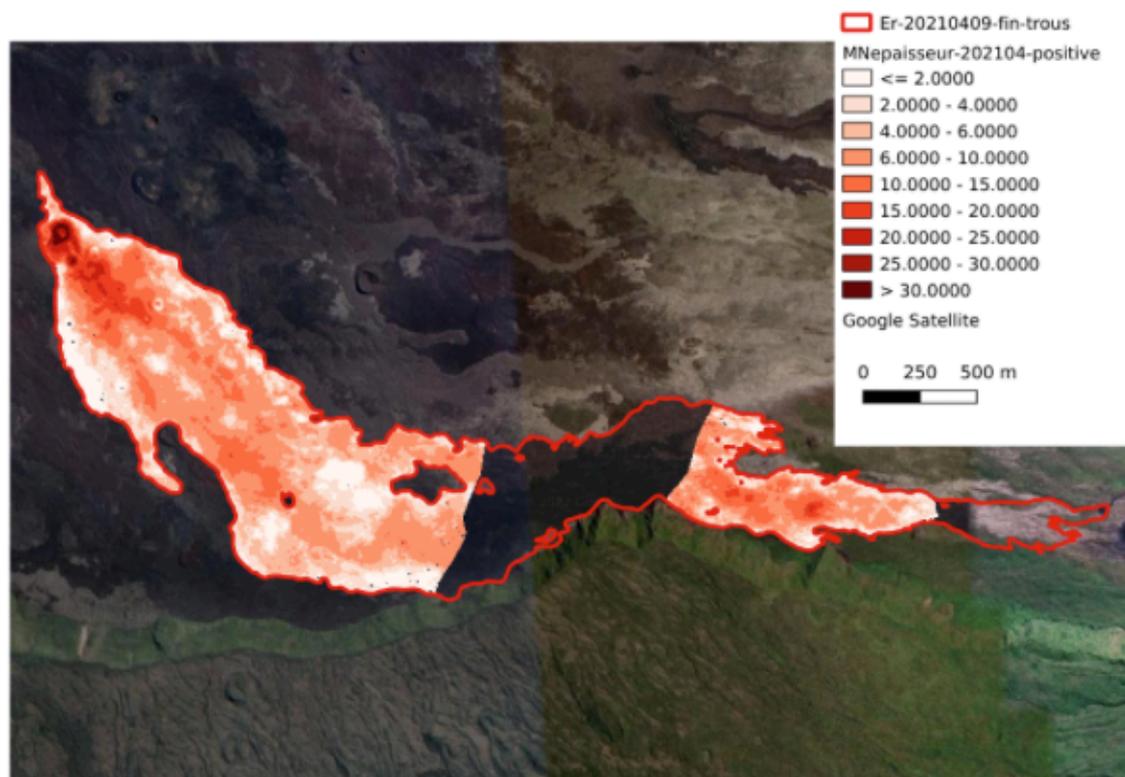


Figure 62 : Cartographie de la coulée d'avril-mai 2021 (2D et 3D) au Piton de la Fournaise sur fond Google Earth, réalisée à partir des ortho-images issues de la stéréophotogrammétrie et des traitements d'images satellites.

3 Le multi spectral

Détection des panaches de SO₂

Au même titre que pour le traitement d'images optiques, un travail « en routine » est réalisé lors des éruptions depuis 2007 pour quantifier la présence de SO₂ volcanique dans un espace de 1000 km x 1000 km centré sur La Réunion.

Par rétro-analyse la base de données remonte sur l'ensemble des éruptions depuis 2003 pour le capteur OMI du satellite américain AURA, depuis septembre 2016 pour le capteur OMPS du satellite américain SUOMI NPP et depuis février 2019 pour les données TROPIMI du satellite européen Sentinel 5.

En 2021, lors de l'éruption d'avril-mai un maximum de SO₂ a été observé le 12 avril selon Tropimi (1.77 KT). OMPS (1.32 KT) et OMI (0.61 KT), très probablement en raison de l'heure et de la géométrie d'observation, montrent respectivement des maximums le 11 et le 13 avril (Figure 63).

Comparées aux moyennes calculées sur l'ensemble de la base de données (sans inclure avril 2007 qui est hors du commun) avec Tropimi à 0.53 KT, OMPS à 0.47 KT et OMI à 0.25 KT, les valeurs enregistrées montrent que le début de l'éruption d'avril 2021 a connu un dégazage important. Ce dégazage fut certes important mais ne se positionne qu'en 35^{ième} position dans les enregistrements OMI au Piton de la Fournaise (hors avril 2007). Les maximums de

OMPS et Tropomi pour cette éruption se placent respectivement en 15^{ème} et 7^{ème} position (compte tenu des enregistrements plus récents).

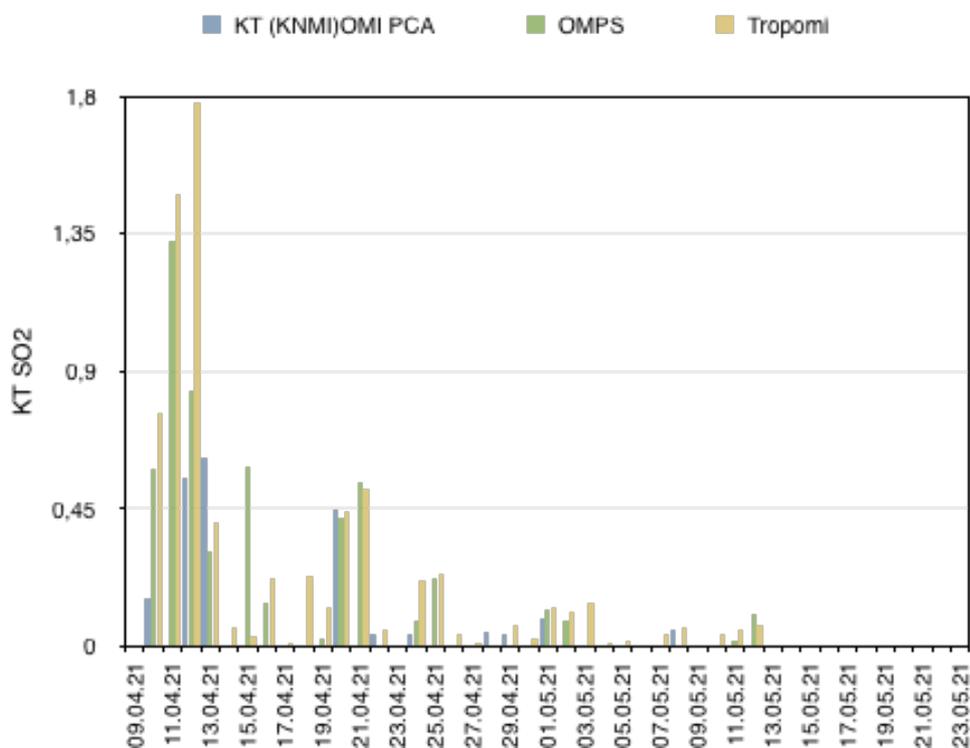


Figure 63 : Mesures de SO₂ par satellites pour l'éruption d'avril-mai 2021.

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

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 (<https://www.mirovaweb.it/>). En 2021, les données de MIROVA ont été, comme les années précédentes, particulièrement utilisées comme données d'entrée pour les simulations numériques réalisées dans le cadre du programme ANR LAVA (cf. section IX.1).

L'OVPF se base également sur les données du service **HOTVOLC** (OPGC/SNOV/INSU), maintenu par son responsable M. Gouhier. Le système HOTVOLC a pour objectif le suivi temps-réel des éruptions volcaniques par télédétection spatiale infrarouge. L'ensemble des données acquises pour les activités d'observation du Piton de la Fournaise proviennent du satellite géostationnaire Meteosat (HRIT - 0° service). Les produits (débits, cartes, etc.) calculés par l'OPGC sont diffusés en libre accès sous la forme (i) d'images géolocalisées ('Geotiff') et de séries temporelles ('CSV') et mis à disposition de l'OVPF pour le suivi opérationnel des éruptions.

L'utilisation d'un satellite météorologique géostationnaire est un avantage car même si la résolution spatiale est faible, la résolution temporelle est incroyablement élevée avec une image toutes les quinze minutes.

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

En 2021, Hotvolc a permis le suivi opérationnel en temps quasi-réel de deux éruptions au Piton de la Fournaise, apportant ainsi des informations, notamment sur le flux lavique (VFR) pour le suivi des éruptions par l’OVPF.

1/ Éruption #1 : 9 avril – 24 mai 2021

La première éruption de l’année 2021 survient le 9 avril aux alentours de 15h00 UTC. La première anomalie thermique est détectée (via le produit : Lava hotspot / NTI*) à 17h15 UTC avec une TSR (Total Spectral Radiance) de 2,6 W/m²/sr/μm, témoignant d’un niveau d’activité faible (code couleur : vert). La dernière acquisition survient le 12 Mai à 10h30 UTC. Les débits calculés donnent une valeur maximum de 38 m³/s, le débit moyen sur la première partie de l’éruption est de 10-15m³/s, puis diminue à 5-10 m³/s en deuxième partie d’éruption.

Les 33 jours d’acquisition représentent le traitement de 3168 images Meteosat dans 6 bandes spectrales (IR). Les modèles opérationnels (i.e., automatisés) de calcul du débit peuvent être entachés d’erreurs, dues aux conditions météorologiques, au passage de la coulée en tunnel de lave, ou en cas de lacune d’acquisition des images.

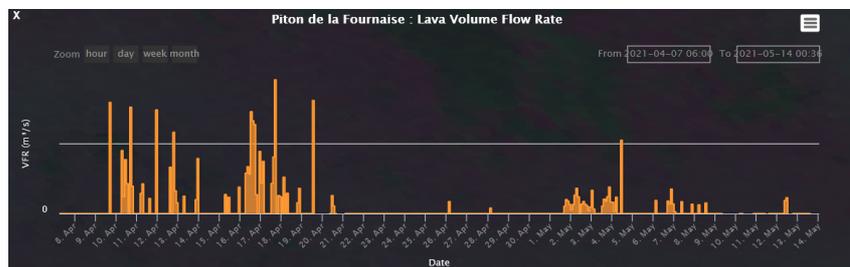
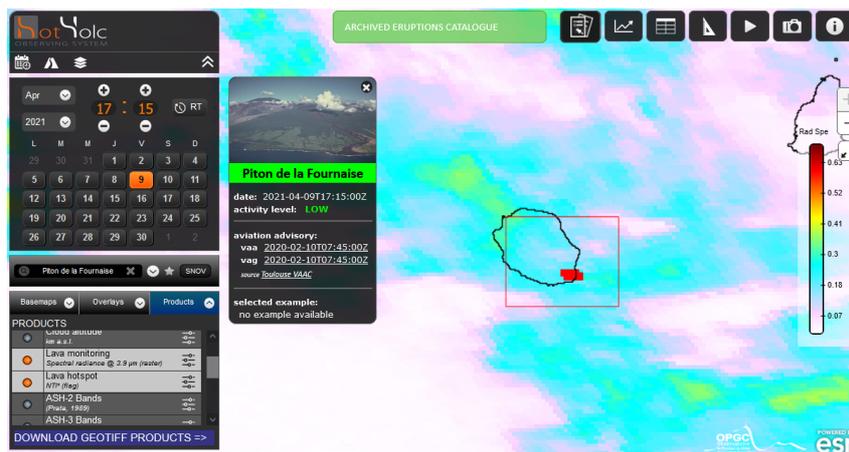


Figure 64 : (haut) Copie-écran HOTVOLC de la première anomalie thermique (09/04/2021 – 17h15 UTC) des produits ‘Lava monitoring’ et ‘Lava hotspot’ témoignant de l’arrivée de lave en surface. (bas) Série temporelle du débit lavique ‘Lava Volume Flow Rate’ (VFR), indiquant l’évolution du débit au cours du temps.

2/ Éruption #2 : 22 décembre 2021 – 17 janvier 2022

La deuxième éruption de l'année 2021 survient le 22 décembre (21 décembre 23h30 heure UTC). La première anomalie thermique est détectée (via le produit : Lava hotspot / NTI*) le 22 décembre à 15h45 UTC avec une TSR (Total Spectral Radiance) de $1,1 \text{ W/m}^2/\text{sr}/\mu\text{m}$, témoignant d'un niveau d'activité faible (code couleur : vert). La dernière anomalie thermique détectée intervient le 18 Janvier 2022 à 04h45. Les débits laviques fluctuent beaucoup avec une valeur maximum de $35 \text{ m}^3/\text{s}$ et une moyenne à $12 \text{ m}^3/\text{s}$ sur l'ensemble de la période (valeurs calculées par moyenne glissante sur 3 points).

Les 28 jours d'acquisition représentent le traitement de 2688 images Meteosat dans 6 bandes spectrales (IR). Les modèles opérationnels (i.e., automatisés) de calcul du débit peuvent être entachés d'erreurs, dues aux conditions météorologiques, au passage de la coulée en tunnel de lave, ou en cas de lacune d'acquisition des images.

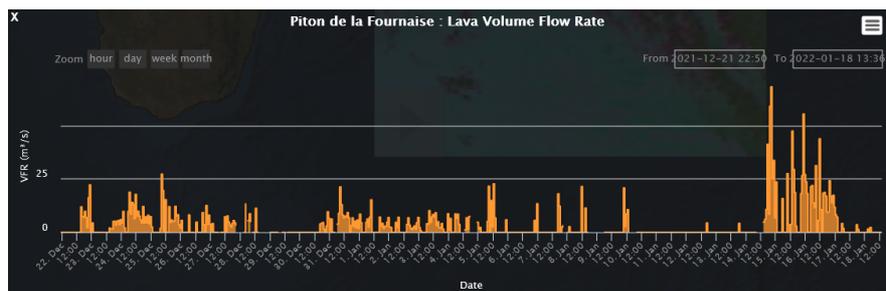
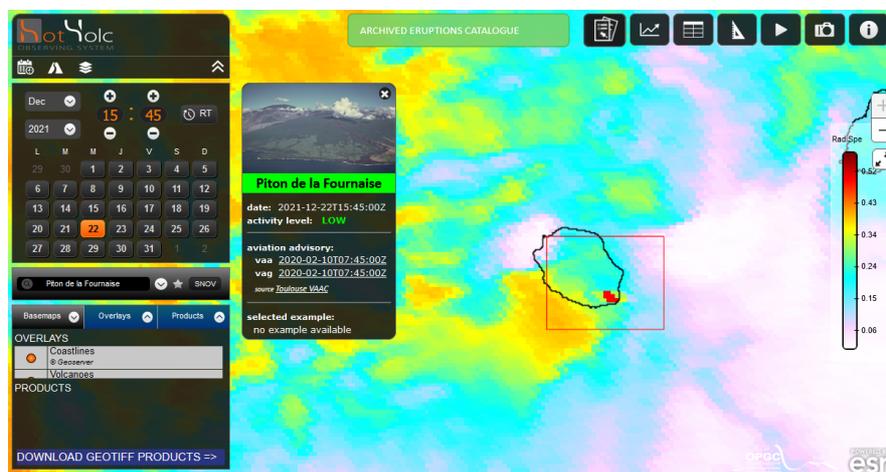


Figure 65 : (En haut) Copie-écran HOTVOLC de la première anomalie thermique (22/12/2021 – 15h45 UTC) des produits 'Lava monitoring' et 'Lava hotspot' témoignant de l'arrivée de lave en surface. (En bas) Série temporelle du débit lavique 'Lava Volume Flow Rate' (VFR), indiquant l'évolution du débit au cours du temps.

VIII Réalisations techniques et informatiques

1 Réalisations techniques

Réseau de surveillance

Une nouvelle station sismique a été installée cette année (Figure 66) : DOD, à Dos d'Âne afin de mieux caractériser la sismicité localisée sous la Roche Écrite.



Figure 66 : Localisation de la nouvelle station DOD.

Une station a été supprimée :

- ADV : station sismique 3 composantes à Sainte Rose dans une ferme solaire (signal trop bruité)

Et une station a été détruite :

- VIL : station sismique détruite par l'éruption d'avril 2021. La perte se chiffre à environ 25 k€ d'équipements.

Le réseau de surveillance de l'OVPF se compose d'une centaine de capteurs (Figure 67) sur lesquels les différentes disciplines et expertises scientifiques peuvent s'appuyer.

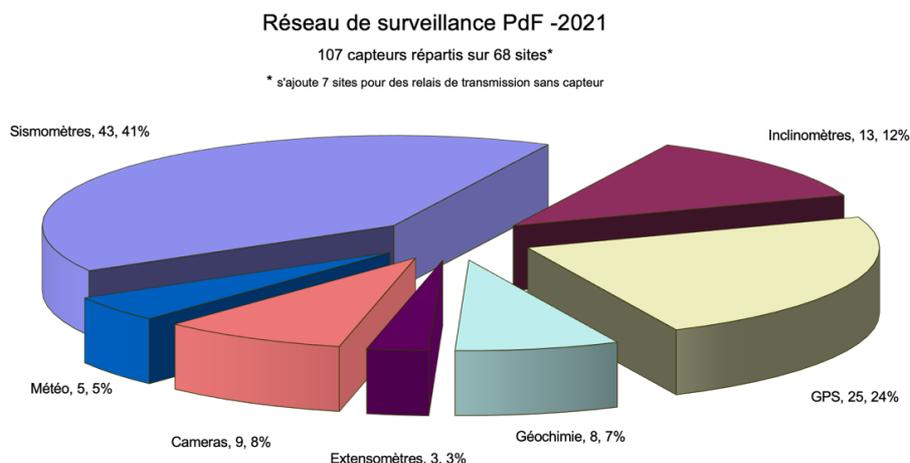


Figure 67 : Répartition des capteurs du réseau de surveillance de l'OVPF en 2021 (capteur, quantité, %).

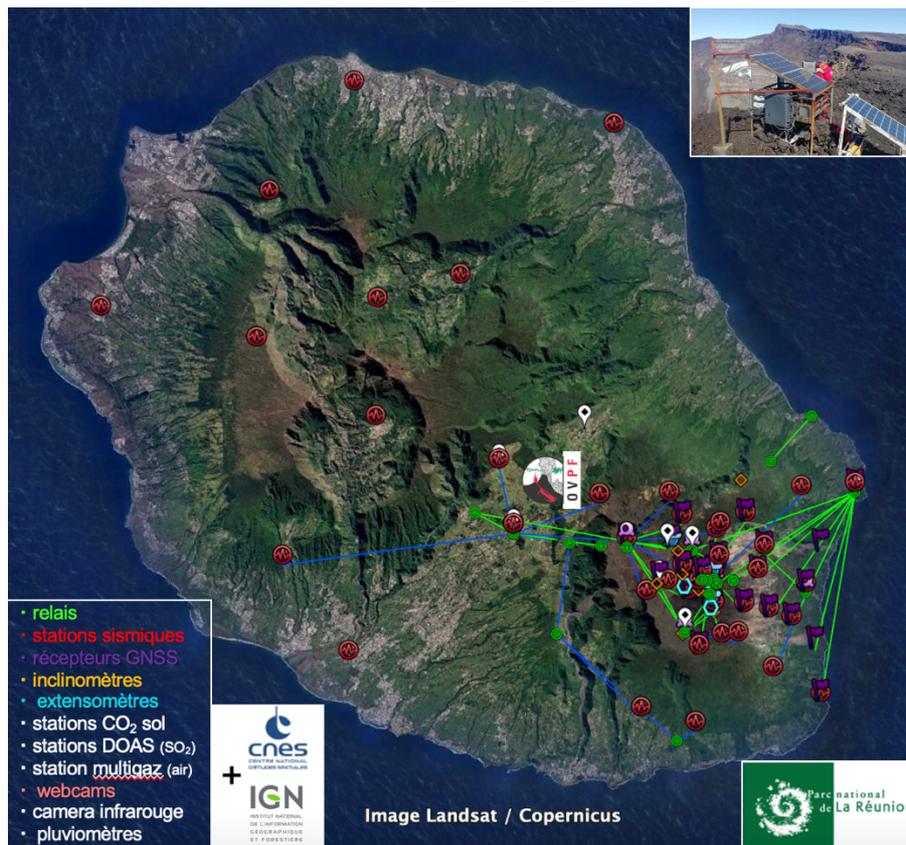


Figure 68 : Carte du réseau de surveillance de l’OVPF en 2021.

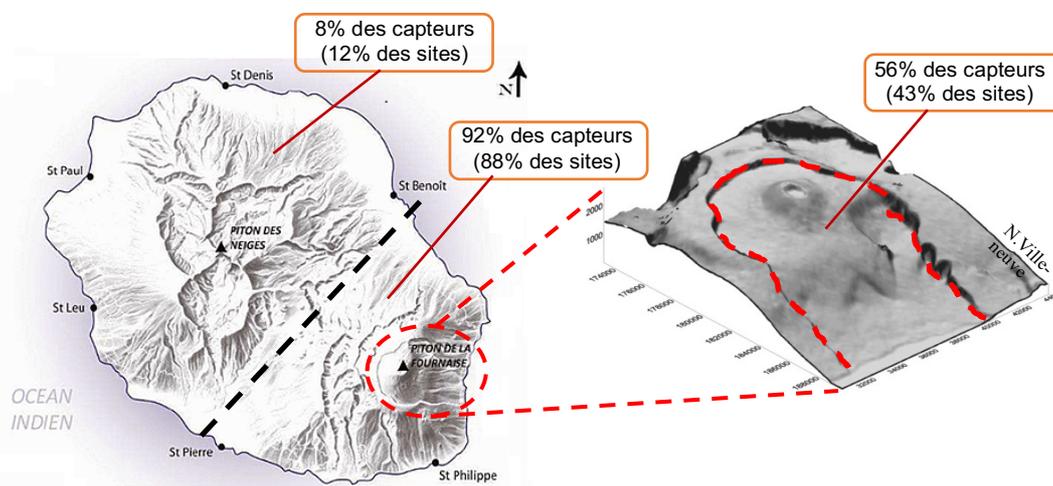


Figure 69 : Répartition géographique des capteurs du réseau de surveillance de l’OVPF en 2021. L’Enclos Fouqué, les Grandes Pentés et le Grand Brûlé concentrent 56% des capteurs (~ 1 capteur/2km² et 1 site/3km²) ; et le massif du Piton de la Fournaise, 92% des capteurs.

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 (Figure 70), 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.

Sur l'évolution du nombre des interventions depuis 2013, on constate une diminution globale des interventions sur les stations (Figure 71) malgré une légère augmentation ces dernières années. Le nombre d'intervention est en hausse par rapport à l'année 2020 avec une augmentation de 27,9% pour un nombre de capteurs stable (107).

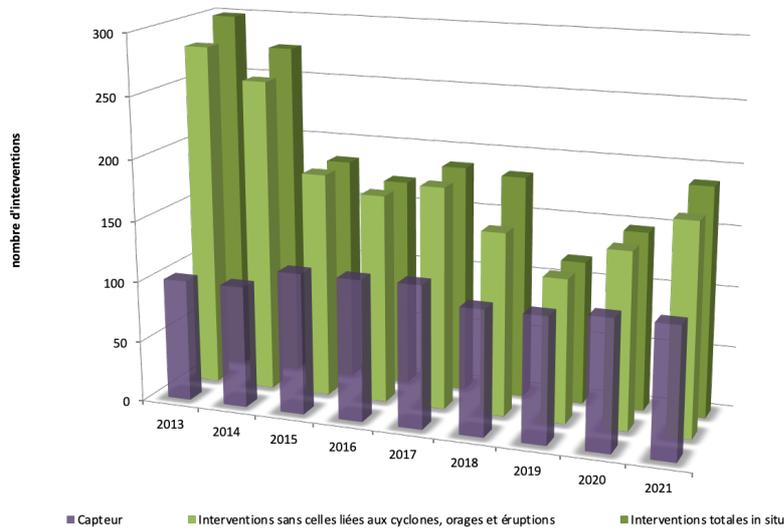
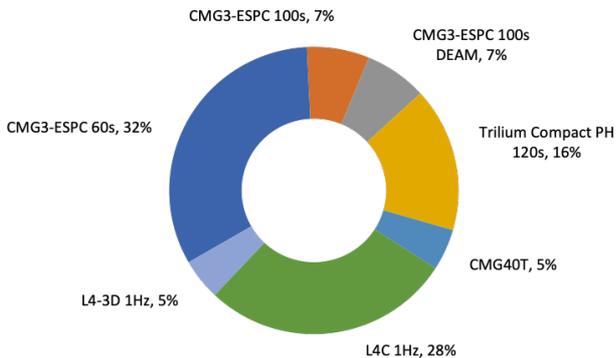


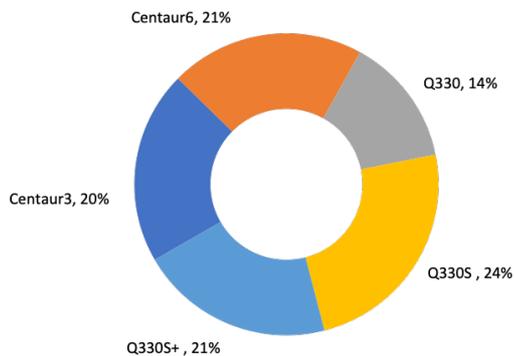
Figure 71 : Évolution du nombre d'interventions sur le réseau de surveillance de 2013 à 2021 avec un nombre total de capteurs relativement stable (14 capteurs supplémentaires entre 2015 et 2018 issus de l'ERC Slidequakes). La diminution globale des interventions reflète les améliorations réalisées sur les infrastructures (structure des stations, gestion de l'énergie, protections foudre), la robustesse du matériel (capteurs, transmission) et la supervision du réseau par l'équipe technique de l'OVPF. A ces interventions viennent s'ajouter les mesures ponctuelles de terrain (géodésie et échantillonnages lors des éruptions) et les interventions de télémaintenance.

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 72).

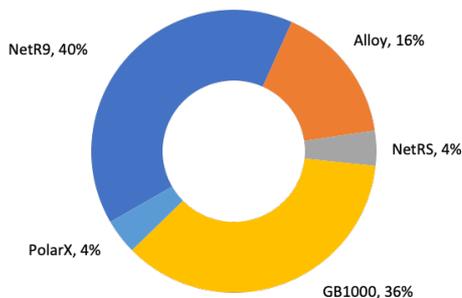
RÉSEAU SISMOMÈTRE, PDF-2021
43 CAPTEURS EN SERVICE



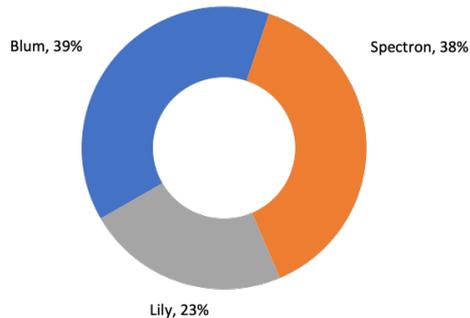
NUMÉRISSEUR SISMIQUE, PDF-2021
29 NUMÉRISSEURS EN SERVICE



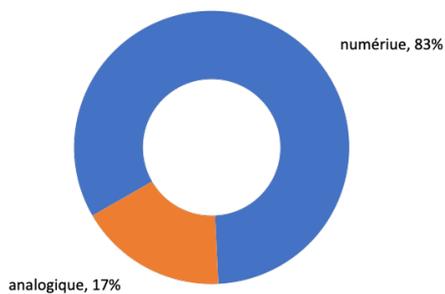
RÉSEAU GNSS, PDF-2021
25 RÉCEPTEURS EN SERVICE



RÉSEAU INCLINOMÈTRE, PDF-2021
13 CAPTEURS EN SERVICE



TRANSMISSION, PDF-2021
86 MOYENS DE TRANSMISSION EN SERVICE



TRANSMISSION NUMÉRIQUE, PDF-2021
71 MOYENS DE TRANSMISSION EN SERVICE

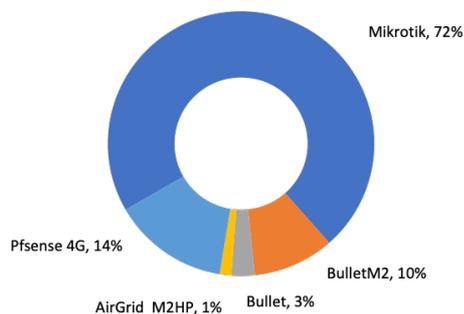


Figure 72 : Répartition des équipements géophysiques des réseaux sismique, géodésique et des moyens de transmission (équipement, %).

Sur le terrain

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

Sismologie

Une nouvelle station sismique a été installée à Dos D'Âne : DODS avec une transmission des données par la 4G.

- ADVS (Adam de Villiers, flanc nord-est hors Enclos) : démontage

La qualité des signaux ne répondait pas aux exigences fixées par l'OVPF. Cette station a été démontée.

- CRAS (Piton de Crac) : remplacement du capteur

Problème sur la chaîne de mesure, le sismomètre et le numériseur ont été remplacés.

- FEUS (Phare de Saint Philippe) : maintenance du numériseur

Remplacement de la carte mémoire interne du numériseur.

- FRES (Fond de la Rivière de l'est) : remplacement de la chaîne de mesure

Le sismomètre, son câble et le numériseur ont été remplacés suite au « vandalisme » bovin.

- HIMS (cratère Himiltrude, flanc nord Enclos) : roll over GPS

Les masses du sismomètre ont pu être recentrées à distance. La puce GPS a été remplacée à titre préventif (roll over)

- PJRS (Pièce Jeanne ; Saint Louis) : remplacement du sismomètre (signaux)

- PRAS (Puy Ramond, Saint Philippe) : remplacement du sismomètre

Problème d'horodatage des données.

- SNES (Soufrière nord-est, sommet) : remplacement du numériseur

- TKRS (Takamaka, flanc sud hors-Enclos) : remplacement du VCO

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

Complétude des données sismiques : récupération des données non télétransmises (transmission en panne, ...) pendant l'année.

Nettoyage des espaces de stockage des numériseurs pour éviter la saturation et la perte de données.

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

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

Géodésie

Dans l'ensemble peu de pannes ont été reportés en 2021 sur ce réseau par rapport aux années précédentes. Un bug dans les récepteurs *Alloy* a été mis en évidence et une mise à jour des récepteurs a pu se faire à distance.

Pas de remplacement de récepteur *Topcon GB1000* obsolète par des plus modernes en 2021 (9 récepteurs doivent encore être remplacés).

Inclinométrie et extensométrie

Plusieurs pannes sur l'ordinateur embarqué en phase de développement des stations BERI (Piton de Bert) et PARI (Piton Partage). Le capteur inclinométrique de la station de forage ENCI (bordure ouest de l'Enclos) est toujours en maintenance à l'OVPF et en attente d'un élément de rechange.

Recentrage des inclinomètres de Blum des stations sommitales DSOI, BORI et SFRI pour éviter qu'ils ne saturent aux prochaines éruptions.

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 planifiés pour 2022/2023.

Plusieurs interventions à distance sur la station DALX (extensomètre à la base ouest du cône terminal) pour une reprogrammation ou une relance du système d'acquisition (et remplacement du GPS du numériseur in situ).

Station SFRX (extensomètre de Soufrière), panne sur l'électronique d'acquisition.

Géochimie

- BERN (Station Novac SO₂, Piton de Bert)

Panne du système d'acquisition du capteur Novac. Certains éléments de la chaîne de mesure sont obsolètes et difficiles à obtenir pour remplacement, sans compter le manque de documentation sur leur mise en œuvre. Cependant, les différentes compétences de l'équipe technique ont permis de s'approprier la technologie et de reprogrammer le système de mesure. La maîtrise du système et sa maintenance profonde sont donc maintenant acquises.

- PARN (station Novac SO₂, Piton Partage)

Comportement instable de la station, une maintenance du même ordre que BERN sera peut-être nécessaire.

- DSON (station multigaz au sommet)

Plusieurs redémarrages gérés à distance, remplacements successifs des acquisitions et remplacements à plusieurs reprises de la pompe de captage.

- PNRN (Station CO₂, sol Plaine des Palmistes)

Panne sur l'anémomètre.

Caméras

Plusieurs redémarrages à distance des différentes caméras. La caméra de CASC (Piton des Cascades) a été hors service à cause d'épisodes orageux (remplacement par une caméra haute résolution). L'équipement embarqué qui gère la caméra de SFRC (Soufrière) a dû être reformaté.

Transmission

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

Pour répondre aux directives de l'Agence Nationale des Fréquences ANFR, une refonte des fréquences de transmission analogique des 13 stations sismologiques courtes périodes (nouvelles fréquences ANFR) est en cours de réalisation. Au total, en comptant les relais, 22 sites sont concernés. Le nouveau matériel a été testé et installé sur plusieurs stations et relais (Figures 73 et 74). En 2021, la station TKR (Takamaka) a été upgradée. A noter que la station TEO (Theophane Begue, Saint Joseph) sera modernisée avec un sismomètre 3 composantes et une transmission numérique. Et n'est donc plus concernée par mise à jour analogique.

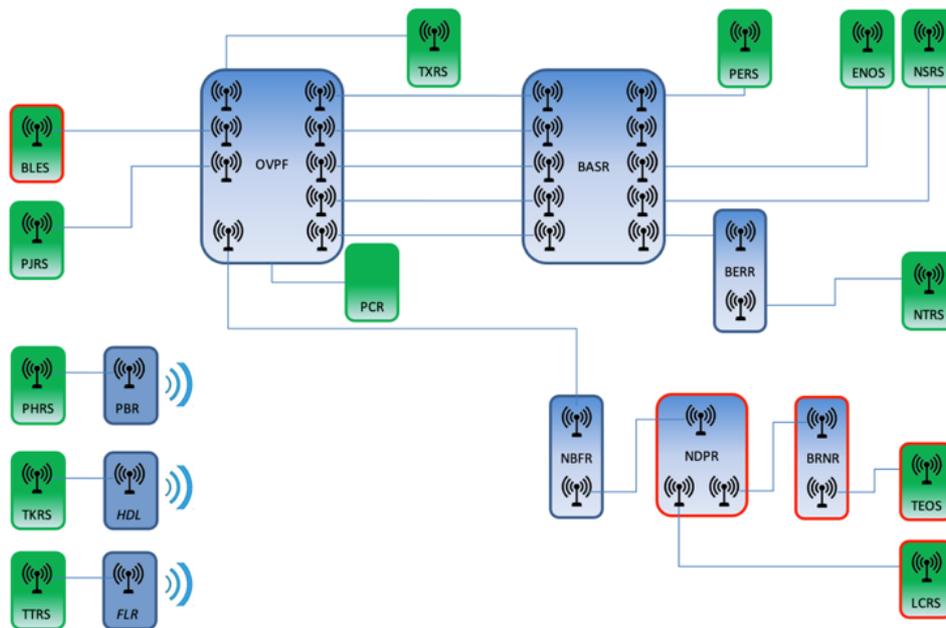


Figure 73 : Transmissions analogiques des sismomètres courte période (stations et relais). Les éléments encadrés en rouge correspondent aux stations et relais dont les équipements et/ou les fréquences de transmission restent à remplacer (BLE nouveau matériel en place et fréquence à modifier).



Figure 74 : Nouveaux équipements de transmission analogique. En haut pour un relais (réception/émission), en bas pour une station (émission).

La migration du matériel de transmission numérique vers des équipements plus performant (*Mikrotik*) continue progressivement avec pour l'année 2021 les stations HDL, CRA, FORX et HIM. De plus, ces équipements sont maintenant systématiquement installés avec du matériel permettant de réaliser des opérations de télé-maintenance (carte relais et/ou port debug) 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 phonique ont été mis en place sur le terrain. Les équipements portables et la solution serveurs permettent d'améliorer la sécurité en géo-localisant les personnels et d'augmenter la portée des communications sur le volcan. Les tests sont en cours.

Les principales pannes : remplacement des cartes relais X440 à BASR, CASR et HDLR.

Entretien des relais analogiques NDPR (Notre Dame de la Paix) et BRNR (Piton Bernard, Saint Joseph) (végétation).

Infrastructure

- BAS (Piton des Basaltes) : remplacement d'une antenne numérique
- BERI (Piton de Bert inclinomètres) : remplacement du panneau solaire vandalisé
- BER (Piton de Bert) : plusieurs pannes de gestion des équipements
- BLE (Piton Bleu) : test de validation d'un régulateur MPPT, interaction nulle avec un sismomètre analogique
- C98 (Coulée 98 hors Enclos) : remplacement de la Mikrotik et câble MPPT ; re-pointage de l'antenne numérique
- CAM (Cambuston, Saint André) : remplacement du VPN
- CAS (Piton des Cascades) : interventions liées aux orages sur la transmission et l'énergie
- CGO (Chemin Go, Plaine des cafres) : remplacement de la batterie et de l'antenne numérique vers BAS
- CIL (Cilaos) : reconfiguration du VPN
- CRA (Piton Crac) : remplacement de la transmission numérique (Mikrotik)
- FEU (Phare de Saint Philippe) : réfection de la porte et des aérations
- FORX (Château Fort extensomètre) : remplacement de la transmission numérique (Mikrotik)
- GIT (Gîte du volcan) : mise en place d'une clôture et sécurisation
- HDL (Hubert Delisle, Grand Brûlé) : plusieurs problèmes d'énergie ; installation d'une nouvelle structure pour renforcer l'énergie ; remplacement des transmissions numériques (Mikrotik)
- HIM (Cratère Himiltrude) : remplacement de la transmission numérique (Mikrotik)
- OBS (Observatoire) : installation d'un coffret supplémentaire et réaménagement des équipements
- PJR (Pièce Jeanne, Saint Louis) : déplacement de la structure pour un meilleur ensoleillement ; remplacement de la batterie
- PRO (Providence, Saint Denis) : panne prolongée du réseau de l'ONF
- RERV (Rivière de l'est) : remplacement des batteries et quelques pannes secteur
- TKR (Takamaka) : remplacement régulateur, batterie et câble alimentation (foudre)

Divers travaux de maintenance sur les stations : niveau d'eau dans certaines batteries (relais), peinture et réfection.

Conception et développement

- Veille technologique

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

▪ Transmission

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

▪ Gestion de l'énergie

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

▪ Projet inclinomètre

Les compétences pour fabriquer les inclinomètres de Blum se sont perdues. Afin d'anticiper les pannes irréversibles de ces inclinomètres, conçus, développés et réalisés à l'IPGP, une réflexion autour d'un projet instrumental sur l'inclinométrie a eu lieu. Ainsi, via l'Appel à Projet de l'IPGP, la conception d'un banc de calibration pour les capteurs inclinométriques a été financée ainsi qu'un stage L3 de 4 mois (financement OVPF). Deux professeurs en mécanique et en électronique ont également travaillé sur ce projet pour leur dossier de concours à l'agrégation.

La réalisation mécanique et la partie électronique sont quasiment achevées (Figures 75 et 76). Des ajustages pendant le développement sont à prévoir. La partie régulation de température des capteurs est assemblée ; le code de contrôle est en cours de réalisation.

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

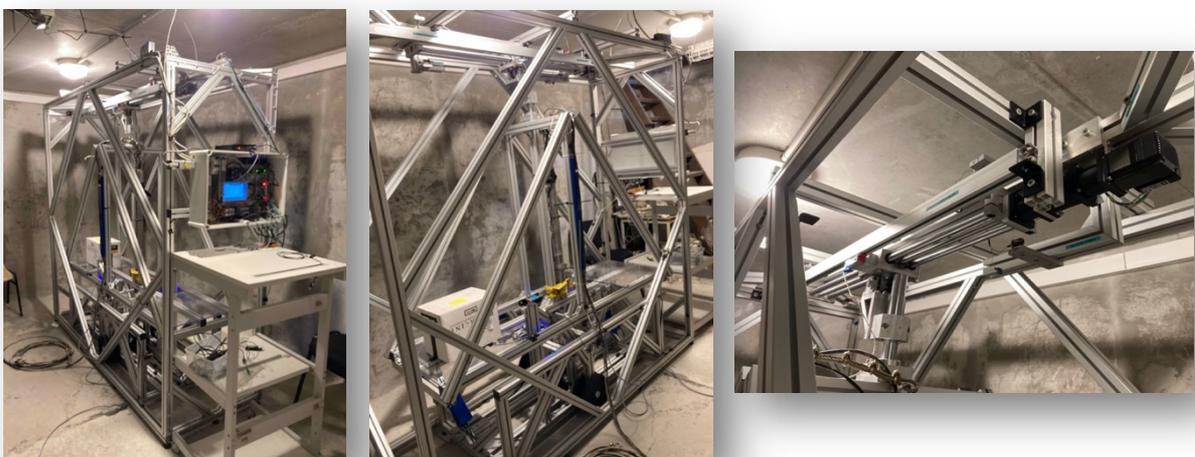


Figure 75 : Photos d'ensemble du banc de calibration et de la table linéaire.

Les premiers résultats sont conformes aux calibrations initiales et permettent donc d'avoir maintenant une courbe de calibration complète. Néanmoins les tests doivent continuer pour affiner le résultat final. En parallèle, l'OVPF a peut-être l'opportunité de se réappropriier la fabrication des inclinomètres de Blum. Une réflexion est en cours pour qu'une partie du personnel soit formé d'une part et pour aménager les locaux d'autre part afin d'avoir un laboratoire dédié à leur assemblage.

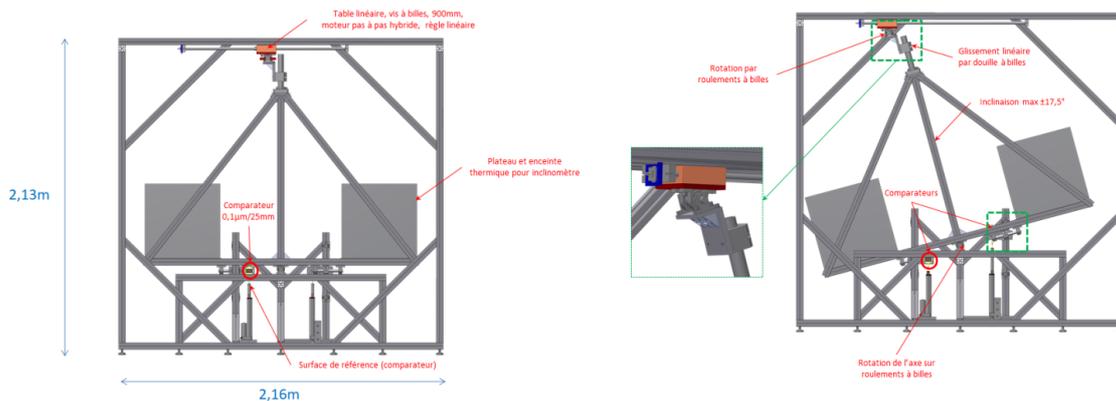


Figure 76 : Modélisation 3D du banc de calibration.

Un autre projet directement lié au banc de calibration est en cours avec la conception d'un instrument inclinométrique de petite taille pouvant être placé dans un « mini-forage » de plusieurs dizaines de centimètres de profondeur dans la roche, avec des moyens légers pour l'installation. Les capteurs inclinométriques et le matériel de forage ont été achetés. La conception des cartes électroniques est terminée et le premier prototype est en phase de test sur pailleasse et sur le banc de calibration. La partie mécanique de conditionnement est en cours de réalisation.

▪ 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 à revoir.

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

▪ Anémomètre

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

- PC embarqué

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

- GETS : Geochemical Easily Transported System

Conception d'une station géochimique avec des capteurs low-cost et facilement transportables (Figure 77). Ce prototype, en cours de développement, permettra d'installer des capteurs au plus proche d'un site éruptif ou sur un drone. Ce projet a démarré en collaboration avec le Lacy, *Laboratoire de l'Atmosphère et des Cyclones* de l'Université de la Réunion et le financement de l'OSU-Réunion avec notamment deux stages IUT de 4 mois en 2019.



Figure 77 : Modélisation 3D, réalisation et assemblage du premier prototype.

Au cours de l'année 2021, un CDD de 6 mois technicien financé par le projet européen *Eurovolc* a travaillé sur le cahier des charges de l'IHM (Interface Homme Machine), la conception et le développement de l'interface graphique utilisateur, le tracé des grandeurs physico-chimiques, la gestion de la base de données et la rédaction d'une documentation complète. Un stagiaire ingénieur a travaillé cette année sur la partie hardware en développant le code embarqué.

Les cartes électroniques ont été sous-traitées et seront assemblées et testées en 2022. Un troisième prototype mécanique en impression 3D, plus compact, est en phase de réalisation. Les différents éléments seront ensuite intégrés pour valider le fonctionnement de l'ensemble.

- RTK

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

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

Collaborations sur projets

- Observatoire Volcanologique du Karthala, OVK, Grandes Comores

Malgré l'absence de mission technique (OVPF vers OVK) en 2021, la collaboration entre les deux observatoires se poursuit. Les moyens techniques mis en œuvre les années précédentes et les méthodologies de télémaintenance portent leurs fruits.

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. L'engagement de l'OVPF pour l'année 2021 est d'une demi-journée par semaine en moyenne pour 1 ingénieur.

Pour fortifier ce partenariat, le projet Interreg Hatari permettra d'installer 4 stations supplémentaires en 2022 (3 sismomètres/GNSS et 1 CO2) ; les capteurs ont été livrés et le reste du matériel est en cours de commande (cf. section IX.2).

- Projet Ministère de la Transition Écologique, IPGP et OVSG-IPGP

Dans le cadre de ce projet 4 forages seront instrumentés en 2022 sur l'île de La Guadeloupe. En collaboration avec les équipes de l'OVSG et de l'IPGP, l'équipe technique de l'OVPF conçoit l'assemblage et à la mise en place de 5 capteurs dans les forages.

- 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 : mise en place d'un relais et des équipements de transmission en cours.

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 :

- 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-hydrigue de certains matériaux et composants du bâtiment.

- Pyrgéomètre, LE2P, Université de La Réunion

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

- Camera IRT

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

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

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

- OPGC, Observatoire de Physique du Globe de Clermont-Ferrand

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

▪ Université de Potsdam, Institut für Geowissenschaften

L'installation pour quelques années d'un nouveau type de capteur sismique BlueSeis à la station RER a pu avoir lieu en 2021 avec une mise à disposition des données en temps réel sur les serveurs de l'IPGP ; post-traitement des données et dataless en cours. Un second capteur avec une antenne sismique devrait être 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.

▪ Observatoire Magnétique

Un site pour l'installation d'un observatoire magnétique pérenne de l'IPGP a été identifié à proximité de l'OVPF. L'installation est programmée pour 2022.

REVOSIMA

Depuis 2020, l'OVPF a également en charge la surveillance opérationnelle de l'activité volcano-sismologique de Mayotte

Ainsi, au même titre que le réseau de surveillance du Piton de la Fournaise, l'équipe technique assure :

- 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 (*voir section suivante, Informatique*)

▪ Réseau Petite Terre

PMZG pérennisation de la station GNSS de Pamandzi avec l'installation d'un coffret dédié, les moyens de transmission des données et de monitoring de la station.

UDMN : upgrade du moyen de transmission et remplacement du chargeur de batterie de la station CO₂.

▪ Réseau Grande Terre

KOUG : installation d'une station sismique à la Mairie de Koungou (coffret, transmission, monitoring). La station fonctionne actuellement uniquement sur batterie, qui est remplacée tous les 10 jours, suite à l'incendie partiel de la mairie.



Figure 78 : localisation de la station KOUG, mairie de Koungou.

RAPPORT ANNUEL OVPF - IPGP – 2021

▪ Ilot Mbouzi

Installation d'une station sismique de test : les données sont satisfaisantes et l'installation d'une station pérenne est programmée pour 2022.

▪ Ile de Grande Glorieuse

Réalisation de la maintenance à distance et gestion des interventions. Il était prévu le remplacement de la transmission satellite par une transmission VSAT IPGP. Finalement la transmission devrait être mutualisée avec les équipements des TAAF (négociation en cours).

▪ Missions en mer

Participation de deux ingénieurs de l'OVPF aux missions en mer.

- MAYOBS18 (12 jours), MAYOBS21 (20 jours) : récupération des OBS (sismomètres fond de mer) par envoi de commandes acoustiques, mesure de dérive d'horloge et extraction des données brutes, réparations de balises radio VHF et flash, redéploiement des OBS.

- MAYOBS18 : remplacement des batteries datalogger, largeur acoustique et balises.

- MAYOBS21 : surveillance des animaux marins pour leur protection contre les émissions des instruments de mesures du bateau. Suite à l'extraction des données, réalisation de leurs traitements, de la génération du mini-SEED et de la livraison.

- MAYOBS22 : phase préparatoire pour la recherche de fournisseur pour les consommables, visite de navire afin de valider la faisabilité d'une mission OBS.

- Visualisation des données brutes extraites des OBS, vérification des données et application de correction si nécessaire, production des données au format mini-SEED à partir des données brutes corrigées.

Bâtiments

Dans la continuité de l'année précédente les travaux et les aménagements ont pu se poursuivre avec la rénovation et l'installation du laboratoire de géochimie qui est maintenant quasiment opérationnel. Il reste à installer la clôture et l'alarme au niveau du bâtiment laboratoire.

Feuille de route pour 2022

Ci-dessous les principaux axes identifiés.

Piton de la Fournaise

- Prospector un nouveau site pour remplacer les stations FLR (Flanc est) et VIL (Cratère Villèle) détruites respectivement lors des éruptions d'avril 2020 et avril 2021.
- TKR (Takamaka) : modernisation de la station avec l'installation d'un sismomètre large bande, un numériseur et un récepteur GNSS ; redimensionnement de la partie énergie.
- VIL (Cratère Villèle) : installation de la station (sismomètre).
- FLR (Flanc Est) : installation de la station (sismomètre, GNSS, inclino, météo, camera).
- LCRS (La Crête, Saint Joseph) : déterminer un site ; modernisation de la station (sismomètre 3 composantes, transmission).
- TEO (Saint Joseph) : moderniser la station (3 composantes et transmission 4G).
- CAS (Piston des Cascades) : réorganiser les équipements pour diminuer les effets des orages.
- GPN (Grandes Pentes Nord) : installation du pluviomètre de MétéoOI ; orientation du sismomètre.
- C98 (Coulée 98, hors Enclos) : rétablir la liaison numérique.
- CPRS (Camp Pierrot, Salazie) : finaliser l'installation (clôture).
- CRA (Piton Crac) : refaire l'installation du sismomètre.
- GGLO (Grande Glorieuse) : remplacement de la transmission satellite.
- ENCI (Bordure ouest Enclos) : remettre en place le capteur, remplacer le PC embarqué.
- BRNR (Saint Joseph) : tout démonter après modernisation de TEO.
- BASR (Piton des Basaltes) : la partie haute de la piste devient inaccessible en 4x4 (rendant difficile le transport de matériel), une solution pérenne doit être mise en œuvre.
- Relais phonie : finaliser la mise en production.
- Monitoring : mettre en œuvre les solutions de visualisation des données sur Webobs via Seiscomp.
- Réflexion sur la fabrication des inclinomètres de Blum.
- Finaliser la migration des fréquences et le remplacement du matériel de transmission des liaisons analogiques suivants les directives de l'ANFR.
- Migration de la base de données GLPI (outil de base de données) des interventions vers Webobs.
- Données lentes : échantillonnage à 1Hz.
- Données lentes : données miniSEED.
- Amélioration des installations de transmission numérique sur les principaux relais (BASR, BERR, ENCR). Optimisation des antennes UHF/VHF à BASR.
- Remplacement des neuf récepteurs GNSS GB1000 obsolètes (suivant financement, 2022/2023).
- BASR (Piton des Basaltes) : modernisation et renforcement de la partie énergie (suivant financement, 2022/2023).
- BOR (Bory) : modernisation et renforcement de la partie énergie (suivant financement, 2022/2023).
- NSR (Nez Coupé Ste Rose) : remplacement de l'infrastructure et installation anémomètre (suivant financement, 2022/2023).

- TTR (Piton trois têtes) : modernisation de la station avec un sismomètre 3 composantes et GNSS (suivant financement, 2022/2023).
- GBNG (Grand Brûlé Nord) : modernisation de la station avec une transmission des données en temps réel, renforcement de l'énergie (suivant financement, 2022/2023).
- BASR (Piton des Basaltes) : modernisation de la partie énergie du relais (batterie, MPPT, monitoring).

REVOSIMA

- Pérenniser l'installation de MTSBG et KNKLG
- Installation d'une station sismique à Combani
- Installation d'une station sismique sur l'îlot Mbouzi
- Prospection pour remplacer les stations sismiques de MTSBS et KNKLS
- Préparer la réalisation d'un forage instrumenté à Petit Terre
- Assurer la continuité des données de GGLO avec la transmission satellite
- Campagnes en mer
- Lac Dziani, instrumentations suivant le financement

Projets

- OVK et OVPF : réalisation et installation des stations du projet Interreg HATARI.
- Installation de l'observatoire magnétique.
- Rivière des Pluies : mise en place d'un relais et des équipements de transmission.
- Projet BlueSeis : installation du sismomètre et de l'antenne sismique à CSS.
- GETS : intégration des différents éléments et premiers tests de validation.
- Projet banc pour inclinomètre : mettre en œuvre la partie régulation en température du capteur ; améliorer la structure mécanique.
- Projet inclinomètre : assembler les différents éléments électroniques et mécaniques et effectuer les premiers tests de l'ensemble sur le banc de calibration ; conception, réalisation et assemblage d'une structure mobile pour guider la perceuse (mini forage).
- Magnétisme : pérenniser la station scalaire à BOR ; manip temporaire magnéto-tellurique à ENO et GBNG.
- Projet INSU DAS dans la Plaine des Sables : installation d'une fibre de plusieurs kilomètres, acquisition, transmission des données suivant le financement.
- Installation d'une camera 4K au Pas de Bellecombe-Jacob, amélioration de la transmission des images jusqu'à l'OVPF et modernisation du relais de BASR (énergie, transmission) en collaboration avec l'IRT (suivant financement).

2 Réalisations informatiques

Projets

- Alarme PGA Mayotte

Dans le cadre des astreintes REVOSIMA qui sont mutualisées avec celles de l'OVPF, il a été décidé de mettre en place une alarme séisme ressenti sur « PGA ».

Le PGA ou accélération maximale du sol (Peak Ground Acceleration) est un paramètre caractérisant le mouvement du sol soumis à des ondes sismiques ; il est lié à la vitesse du sol se déplaçant lors d'un séisme.

Le fonctionnement de l'alarme PGA est basé sur Seiscomp3. Pour chaque nouvel événement sismique, un script est lancé (avec les stations concernées par le PGA en paramètre). Un autre script est lancé par ce dernier si une station dépasse le seuil en mg. Un appel téléphonique est envoyé à la personne d'astreinte en cas de dépassement de seuil.

Cette nouvelle alarme est en cours de mise en production (il reste à définir les seuils PGA).

- Projet Interreg HATARI (cf. section IX.2)

Le service informatique a aidé à la rédaction du cahier des charges du projet. Des outils collaboratifs (applications CNRS MyCore) ont été proposés aux gestionnaires du projet. Le service informatique de l'OVPF a également formé les utilisateurs et produit une documentation.

- Projet Phasenet / PhaseWorm

La méthode *PhaseNet* est basée sur un réseau de neurones profonds pour identifier en temps réel les ondes sismiques P et S sur les données des sismomètres à 1 et 3 composantes. Associé au système *EarthWorm* (logiciel de pointés et de détections automatiques), il permet l'identification de phase pour détecter et localiser les événements sismiques, qui sont finalement archivés dans une base de données *SeisComp3* (logiciel de sismologie pour l'acquisition, le traitement, la distribution et l'analyse interactive de données). Ce système innovant de traitement en temps réel est désormais opérationnel pour suivre la sismicité à Mayotte. Le service informatique a mis en production cette solution logicielle.

- REB (bluseis)

Dans le cadre de l'installation d'un nouveau type de capteur sismique BlueSeis à la station RER (dans le tunnel EDF de la Rivière de l'est), en collaboration avec l'université de Potsdam, nous avons mis en place la récupération des données temps réel, leur archivage et leur distribution vers le centre de données de l'IPGP.

- Refonte du Système d'Information de l'Observatoire

Cette année, le projet de refonte de l'infrastructure informatique de l'OVPF s'est poursuivi. Un tri et un nettoyage de la salle serveur ont été effectués afin de vider le matériel devenu obsolète. La salle serveur a

également été réaménagé avec l'aide du Service Technique afin de retirer 2 baies d'équipements analogiques qui ne servaient plus et 2 nouvelles étagères ont été installées pour entreposer le stock informatique. Des barres d'alimentation IP ont été mises en place afin de migrer l'alimentation du cluster actuel dessus, pour se débarrasser des multiprises historiques non adaptées. Cette amélioration nous permettra à terme d'effectuer une meilleure surveillance à distance de nos serveurs ainsi que la possibilité de mener des actions sur leur alimentation.

Enfin, le service informatique a mis en place un « lab » (petite infrastructure informatique pour mener des tests avant mise en production) afin de tester et de mettre en place nos futurs services réseaux. Un serveur de virtualisation avec la dernière version de *Proxmox VE*, un serveur de fichiers avec la dernière version de *TrueNAS CORE* et un serveur virtuel avec *Samba AD*, ainsi qu'un contrôleur de domaine ont été installés. Ce dernier, nous permet de gérer l'authentification des utilisateurs ainsi que leurs droits d'accès. Les tests sont en cours de finalisation mais sont déjà très encourageants pour la suite du projet.

- Quakelink

Mise en place du protocole *QuakeLink* pour la synchronisation des bases de données d'évènements sismiques du REVOSIMA entre l'OVPF et le centre de données de l'IPGP. Ce protocole est plus fiable que celui utilisé précédemment (*scimport et scimex*) ; il possède une mémoire tampon qui évite de perdre des données en cas de coupures réseau.

Cette solution sera étendue aux évènements sismiques de l'OVPF.

Développement

- Qualité des données sismiques

Finalisation du code afin de permettre l'affichage des signaux SOH pour l'ensemble des stations OVPF.

Administration système

- Mise à jour

. Progiciels : portail web de surveillance de l'OVPF : *Webobs* et progiciels de traitement et calcul GNSS : *GAMIT, Gipsyx, Spectra Precision Survey Office*.

. Parc informatique : mise à niveau vers *Windows 10, Pack Microsoft Office 2019, licence Kaspersky Antivirus*.

- Acquisition des données lentes nouvelle génération et MPPT

Mise en place d'un serveur virtuel et de la solution *Seiscomp3* pour l'acquisition des données lentes nouvelle génération (format SEED) et des données des régulateurs solaires MPPT.

Ces données seront ensuite représentées et affichées grâce à des PROCS WebObs.

- Surveillance du fonctionnement informatique et du bon acheminement des données sismiques

Mise à jour du système de surveillance pour prendre en compte les nouveaux serveurs / stations.

- Liste de diffusion

Configuration et gestion de nouvelles listes de diffusion CNRS pour les besoins de l'OVPF (ovpf_com, ovpf_gestioncrise) pour une diffusion plus large et efficace des communiqués de l'OVPF auprès de nos partenaires et migration du système d'envoi de mail historique des bulletins semi-automatiques d'activité vers des listes de diffusion CNRS.

- Webobs (portail web de surveillance de l'OVPF)

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

Création des nouveaux nodes d'infrastructure pour les stations dans Webobs.

Intégration de la totalité des stations du réseau de l'Observatoire Volcanologique du Karthala (réseau KA). Déploiement en cours d'un nouveau module (appelés PROC dans Webobs), la PROC de visualisation des données filtrées de CO₂ issues du réseau REVOSIMA.

- Tâches classiques d'administration système

Sauvegarde, gestion de l'espace disque, remplacement disque HS, diagnostic et résolution de pannes, etc.

Administration réseau

- Installation d'une nouvelle station sismique à Dos d'Âne transmise en 4G (DOD).
- Finaliser l'accès à l'ensemble des stations distantes depuis le VPN de Télétravail.
- Interventions de terrain pour des pannes informatiques sur des sites distants (CAM, MVL).
- Tâches classiques d'administration réseau.

Ouverture d'accès, mises à jour des règles du pare-feu, diagnostic et résolution des pannes, etc.

Gestion du parc GNSS

Diagnostic de pannes sur les capteurs GNSS (stations GPSG et HDLG), configuration des récepteurs, gestion du SAV, aide aux missions de terrains, inventaire des nouveaux récepteurs.

Administratif

- Budget informatique

Gestion du budget informatique, demande de devis, passage de commandes, suivi SAV....

- Astreinte surveillance

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

- Réflexion sur les missions du service informatique

Définition des missions et du périmètre d'action du Service Informatique de l'OVPF.

Divers

- Tâches quotidiennes en informatique

- Assistance aux utilisateurs et dépannage (répondre aux demandes, besoins particuliers et soucis informatiques).
- Faciliter l'accès et fournir les données (actuelles et historiques) aux scientifiques.
- Investigation et résolution des problèmes, bugs et pannes informatiques diverses (affichage de données, correction de scripts, configuration de matériel, etc.).
- Gestion des nouveaux arrivants (nombreux cette année).

- Documentation

Production de documentation et mises à jour des procédures existantes, notamment pour les arrivées et départs de personnels, l'ajout et la suppression de stations sismiques.

- Stage *Apache Airflow*

Accueil et suivi d'un stagiaire d'IUT Réseaux informatiques et Télécommunications (3 mois) pour la mise en place du service *Apache Airflow*, un gestionnaire de flux de données.

- Tests d'outils informatiques :

- *RESANA*, une plateforme collaborative similaire à ce que *Google* propose avec *Gdrive*.
- *Tchap*, un outil de messagerie instantanée.
- *MeshCentral*, un outil d'administration à distance des postes de travail.

- Installation d'ordinateurs

Mise en service (préparation + inventaire) de 8 ordinateurs : 7 portables (6 *Windows* et 1 *Linux*) et 1 ordinateur fixe (*Linux*) pour l'arrivée de nouveaux personnels (permanents, contractuels, stagiaires).

RAPPORT ANNUEL OVPF - IPGP – 2021

- Communication

Rappel sur les bonnes pratiques et les dangers informatiques lors de campagnes de phishing et autres virus.
Mise en place d'un nouveau système de visioconférence pour les réunions hebdomadaires.

- Veille technologique

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

- Station magnétique

Gestion de l'acquisition de la station magnétique installée par le LMV (Université Clermont Auvergne) et dépannage.

Aide à la définition des besoins pour l'installation de futures stations magnétiques permanentes.

IX Projets ambitieux au sein de l'OVPF ou en collaboration avec l'OVPF

1 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 2016 et s'est poursuivi en 2021.

- ANR « LAVA: Lava and the City: Risk Assessment, Hazard Mitigation and Crisis Management of Effusive Disasters» (2016-2020) – prolongé jusqu'en juillet 2021.

Porteur du projet : Andrew Harris (LMV)

Laboratoires impliqués : OVPF-IPGP - LMV (Université Clermont Auvergne) - Université de Grenoble - Université de la Réunion/IPGP

Montant : 414 000 euros

Résumé du projet ANR LAVA :

Les populations installées sur les flancs des volcans actifs sont exposées à un risque volcanique considérable associé à l'activité explosive et effusive des volcans. Si des efforts importants de recherche ont permis d'améliorer considérablement nos connaissances du risque lié à l'activité explosive, les processus fondamentaux associés au risque de type effusif sont bien moins contraints. Le nombre de victimes résultant de l'activité effusive est très faible, néanmoins l'invasion de zones urbanisées par les laves demandera leur évacuation et le déplacement temporaire des habitants et affectera les infrastructures et la végétation qui seront incendiées et ensevelies. Malgré le fait que la plupart des centres volcaniques effusifs soient densément végétalisés, on connaît mal l'effet de l'interaction lave-végétation sur la propagation des coulées. On peut supposer, a priori, que la combustion de la végétation puisse avoir un effet ralentissant sur la propagation des laves et ainsi représenter une stratégie efficace et à bas coût, pour retarder l'invasion des zones urbanisées. Le dégazage de la lave lors de l'écoulement et son effet sur la cristallisation, l'augmentation de viscosité et ultimement la dynamique de progression des coulées sont aussi mal connus. Dans notre projet, nous allons apporter des connaissances nouvelles et originales sur ces processus clés, qui permettront de rendre plus robuste la modélisation physique de l'écoulement de lave sur des zones vulnérables et végétalisées. Notre modélisation sera soucieuse de prendre en compte, par le biais d'un système d'information géographique, l'ensemble des informations relatives à la distribution spatiale des types de construction, de la population et de la végétation. Cette approche permettra de quantifier et d'anticiper l'impact attendu sur le territoire. Notre démarche permettra une évaluation objective et critique des moyens potentiels pour dévier les coulées, minimiser leur impact et mettre en place des mesures préventives. Les événements récents (e.g. éruption 2010 en Islande) ont démontré que notre capacité à répondre efficacement aux crises volcaniques est fortement dépendante du niveau de compréhension et de diffusion de l'information par les médias. En conséquence, notre projet porte aussi sur l'amélioration de la communication des résultats scientifiques par

les médias vers la population, de façon à améliorer la réponse aux crises volcaniques. Une information pertinente et efficace qui permette aux populations de mettre en place des procédures efficaces de prévention et de réponse aux crises est un élément fondamental pour minimiser l'impact des éruptions volcaniques. Les scientifiques doivent être préparés à transmettre des informations fondamentales à la population pour l'aider à affronter les crises volcaniques.

Cette préparation intégrera la mise en place et l'utilisation de «hubs» de distribution de l'information pour permettre une éducation et une diffusion de l'information efficaces ainsi que des exercices/ateliers qui mobiliseront l'ensemble d'une communauté. Dans le cadre de notre projet, nous avons développé deux partenariats et associé quatre laboratoires français de trois instituts différents de façon à concevoir ensemble un système de réponse opérationnel en temps réel, qui puisse être utilisé pendant une crise éruptive effusive, ainsi que des activités d'éducation et diffusion de l'information avant les crises volcaniques. Le projet se focalisera sur l'activité effusive du Piton de la Fournaise (Ile de La Réunion), un volcan très actif, dont les flancs sont densément peuplés et fortement végétalisés.

Lien : <http://www.agence-nationale-recherche.fr/?Projet=ANR-16-CE39-0009>

Lien nouveau site web : <https://sites.google.com/view/anrlava/>

Actions menées en 2021 :

Les actions menées en 2021 s'articulent autour de trois activités principales :

- la rédaction et la publication d'un article

Chevreil, M.O., M. Favalli, N. Villeneuve, A.J.L. Harris, A. Fornaciai, N. Richter, A. Derrien, P. Boissier, A. Di Muro, A. Peltier (2021), Lava flow hazard map of Piton de la Fournaise volcano, Natural Hazards and Earth System Sciences, 21, 2355–2377, 2021, <https://doi.org/10.5194/nhess-21-2355-2021>,

- la production de cartes d'anticipation et de suivi des écoulements de lave lors des crises éruptives au Piton de la Fournaise qui ont eu lieu au cours de l'année,

- l'organisation d'un workshop international « Effusive crisis response virtual workshop » du 12 au 15 avril 2021, qui devait se tenir en présentiel à La Réunion, mais qui s'est finalement déroulé en distanciel du fait des restrictions sanitaires liées à la pandémie de covid-19.

Anticipation et de suivi des écoulements de lave

La modélisation, qui repose sur la combinaison des modèles DOWNFLOW et FLOWGO, permet d'obtenir rapidement l'étendu probable d'une coulée de lave lors d'une éruption.

Pour chaque éruption de 2021, des cartes de modélisation d'écoulement ont été produites et utilisées par l'OVPF lors des gestions de crises opérationnelles et lors de ses interactions avec l'EMZPCOI et le SDIS.

Éruptions suivies par LAVA en 2021 :

→ 9 avril – 24 mai 2021

→ 22 décembre 2021 – 17 janvier 2022

Résultats obtenus pour l'éruption du 9 avril – 24 mai 2021

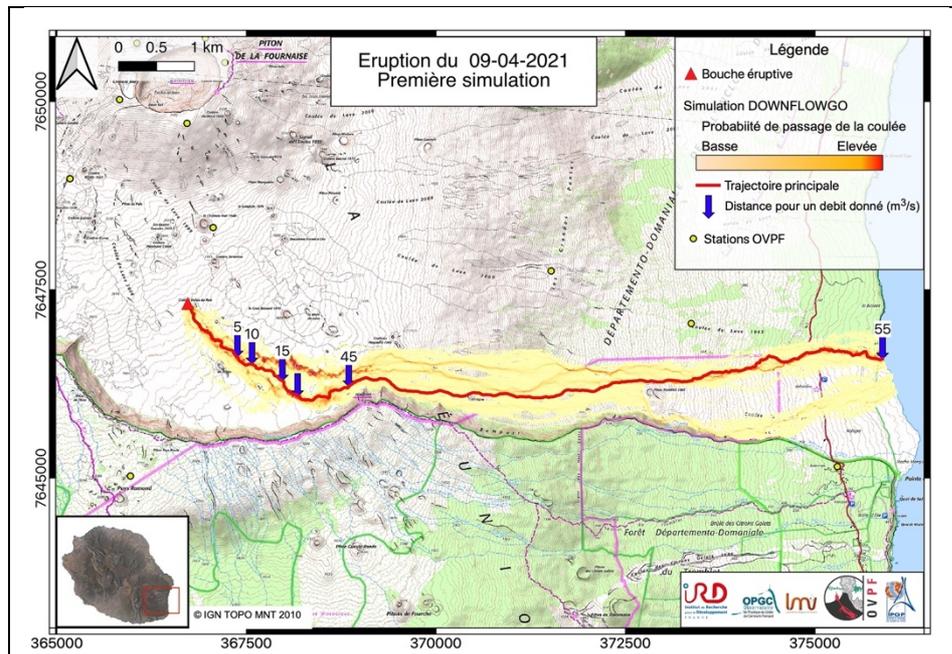


Figure 79 : Première carte de simulation DOWNFLOWGO réalisée le 10/04/2021 suite à la reconnaissance aérienne par l'OVPF.

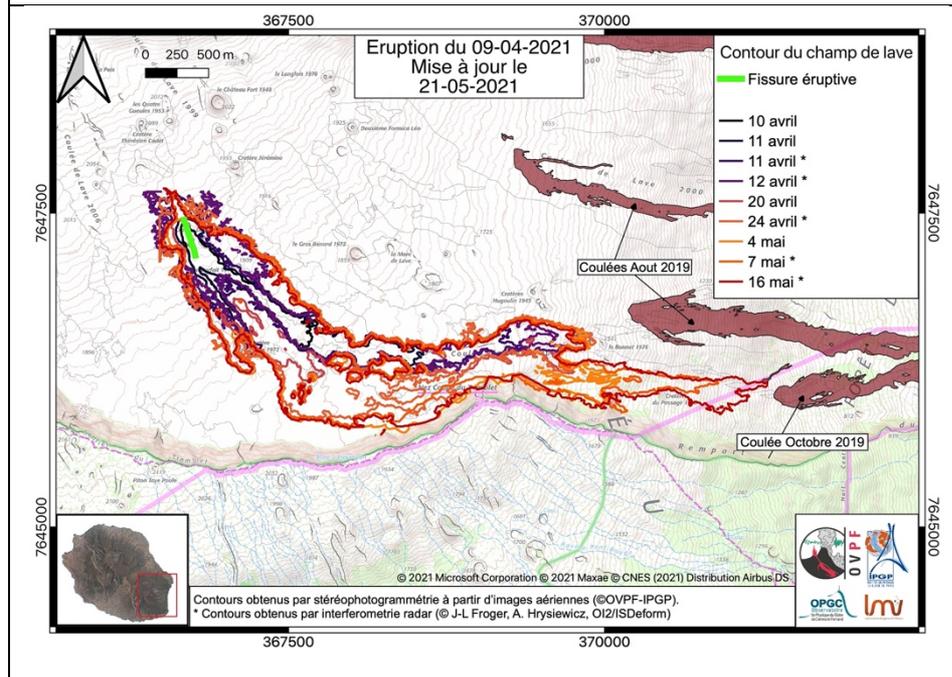


Figure 80 : Évolution des contours des coulées de lave au cours du temps lors de l'éruption du 9 avril-24 mai 2021. Les contours ont été déterminés à partir du traitement d'images aériennes par stéréophotogrammétrie ou par l'analyse des données de cohérence des acquisitions InSAR (©OVPF-IPGP-OPGC-LMV-OI2/ISDeform).

Résultats obtenus pour l'éruption du 22 décembre 2021 – 17 janvier 2022

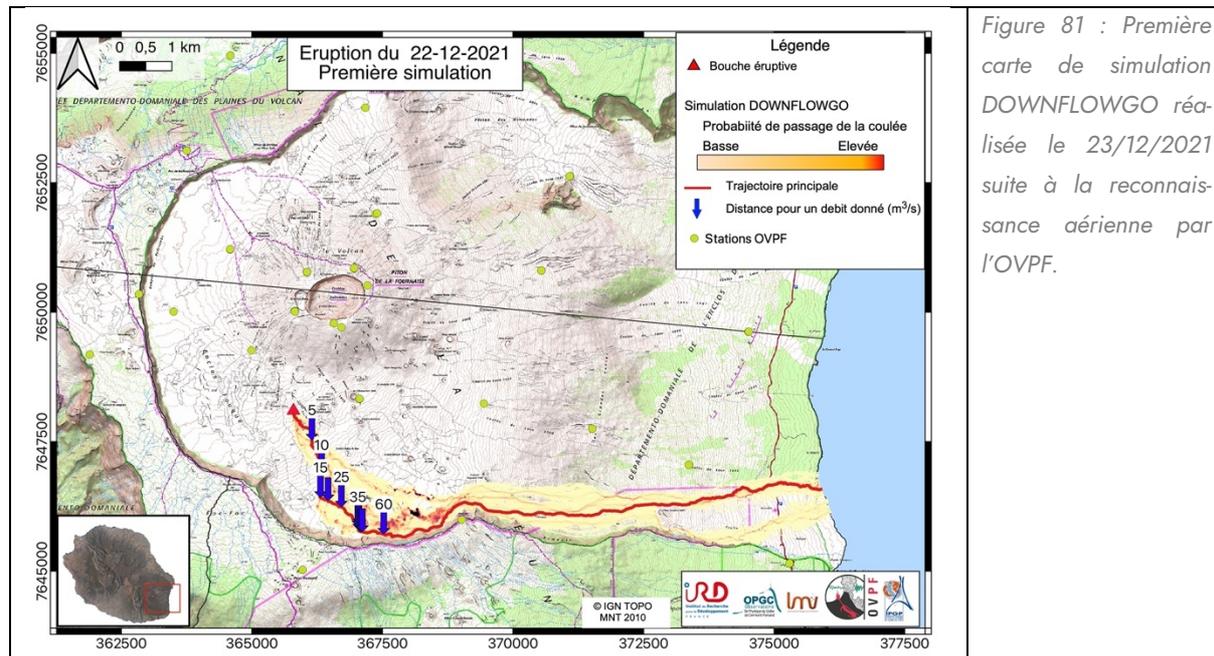


Figure 81 : Première carte de simulation DOWNFLOWGO réalisée le 23/12/2021 suite à la reconnaissance aérienne par l'OVPF.

Valorisations

- Collaborations au niveau national et international bien établies pour une réponse efficace aux éruptions du Piton de la Fournaise et applicable à d'autres volcans.
- Les cartes produites lors des éruptions depuis 2016 ont toutes été utilisées pour les gestions de crises éruptives par l'OVPF et l'EMZPCOI.
- Au total, depuis 2017, l'ANR LAVA a produit 20 articles de rang A.

- ANR RidgeFactory Slow: Interactions fluide-roche en contexte d'exhumation du manteau aux dorsales lentes. Etude d'un cas extrême peu magmatique (2018-2022)

Porteur du projet : Mathilde Cannat (IPGP)

Laboratoires impliqués IPGP - ISTEP (Sorbonne Université)

Montant : 478 332 euros

Résumé du projet ANR RidgeFactory Slow :

Les dorsales médio-océaniques peuvent être vues comme des usines produisant la nouvelle lithosphère océanique qui sera recyclée dans le manteau aux zones de subduction. Cela implique des échanges hydrothermaux de chaleur et de matière avec l'océan, contribuant aux échanges à long terme entre la Terre solide et ses enveloppes fluides. Aux dorsales lentes (et certaines marges continentales distales), les nouveaux fonds marins comprennent des roches du manteau exhumées tectoniquement. Les réactions hydrothermales conduisent à l'hydratation de ces roches (serpentinisation), à la libération de volumes substantiels d'hydrogène et de méthane, à l'émission de fluides à pH élevé et à la cristallisation de carbonates et de composés

carbonés réduits solides. Nous proposons de traiter les données de 2 campagnes océanographiques récentes pour contribuer à une meilleure compréhension de ces processus, en nous concentrant sur le cas extrême pauvre en magma de la dorsale Sud-Ouest Indienne orientale.

- Dans la continuité de de l'ANR SlideVOLC (2017-2019) et en avant-projet de l'ANR Scan4Volc (qui débutera en 2022), des études se sont poursuivies sur la modélisation 3D de déformations du massif de La Fournaise, afin d'identifier les conséquences sur la sismicité sous le Flanc Est du Piton de la Fournaise et son glissement.

Collaborations : OVPF-IPGP, Université de Toulouse IRD, ISTERre, LMV-Université Clermont Auvergne

L'identification des causes de la déstabilisation des flancs des édifices volcaniques actifs est essentielle pour prévenir les événements catastrophiques. La sismicité persistante enregistrée sous le flanc Est du volcan de la Fournaise, entre et pendant les événements éruptifs, peut donner des indications sur la stabilité mécanique de l'édifice. Cette sismicité asymétrique en forme de "coupe" est-elle liée à des injections de magma et déclenche-t-elle un glissement de flanc gravitationnel ? C'est le sujet d'une étude réalisée courant 2021 et soumise à *Journal of Volcanological and Geothermal Research*.

Nous modélisons le comportement élasto-plastique de l'édifice volcanique à l'échelle crustale, avec un code à éléments finis 3D incluant la topographie de l'édifice et des forçages mécaniques dues aux surpressions magmatiques (dike et chambre magmatique).

Sous l'effet de la topographie, une zone de cisaillement asymétrique se développe jusqu'à -3 km (sous le niveau de la mer) sous le flanc Est uniquement si la résistance à la traction, la cohésion et l'angle de frottement sont réglés aussi bas que 1.5 MPa, 3 MPa et 3°, respectivement ; ces valeurs fournissent des bornes pour la résistance de l'édifice.

La deuxième partie de cette étude explore l'influence d'une surpression interne, qui est soit appliquée comme une source d'inflation verticale située à environ 500 m sous la surface du flanc Est, simulant un dike distal, soit à partir d'un ellipsoïde plus profond simulant le réservoir de magma situé près du niveau de la mer sous le sommet. La géométrie de la déformation résultante forme une zone de cisaillement en forme de coupe plongeant sous les flancs Est de l'édifice, atteignant une profondeur de -2 km (sous le niveau de la mer ; Figure 82). La zone de cisaillement produite par le gonflement dû au réservoir plonge plus profondément sous le flanc Est que celle induite par un dike. Elle coïncide aussi mieux avec la forme de la coupe sismique observée. Par conséquent, nous proposons que cette coupe sismique soit une conséquence mécanique de l'apport continu de magma dans le réservoir. Elle peut également refléter une frontière rhéologique entre la roche résistante profonde et les couches superficielles, pentées moins résistantes et affectées par les circulations hydrothermales peu profondes de l'Enclos Fouqué.

Cette zone de cisaillement délimite également un domaine profond en relative dilatation surmonté d'un toit en relative constriction, un contexte mécanique favorisant le stockage in-situ de magma venant de plus profond.

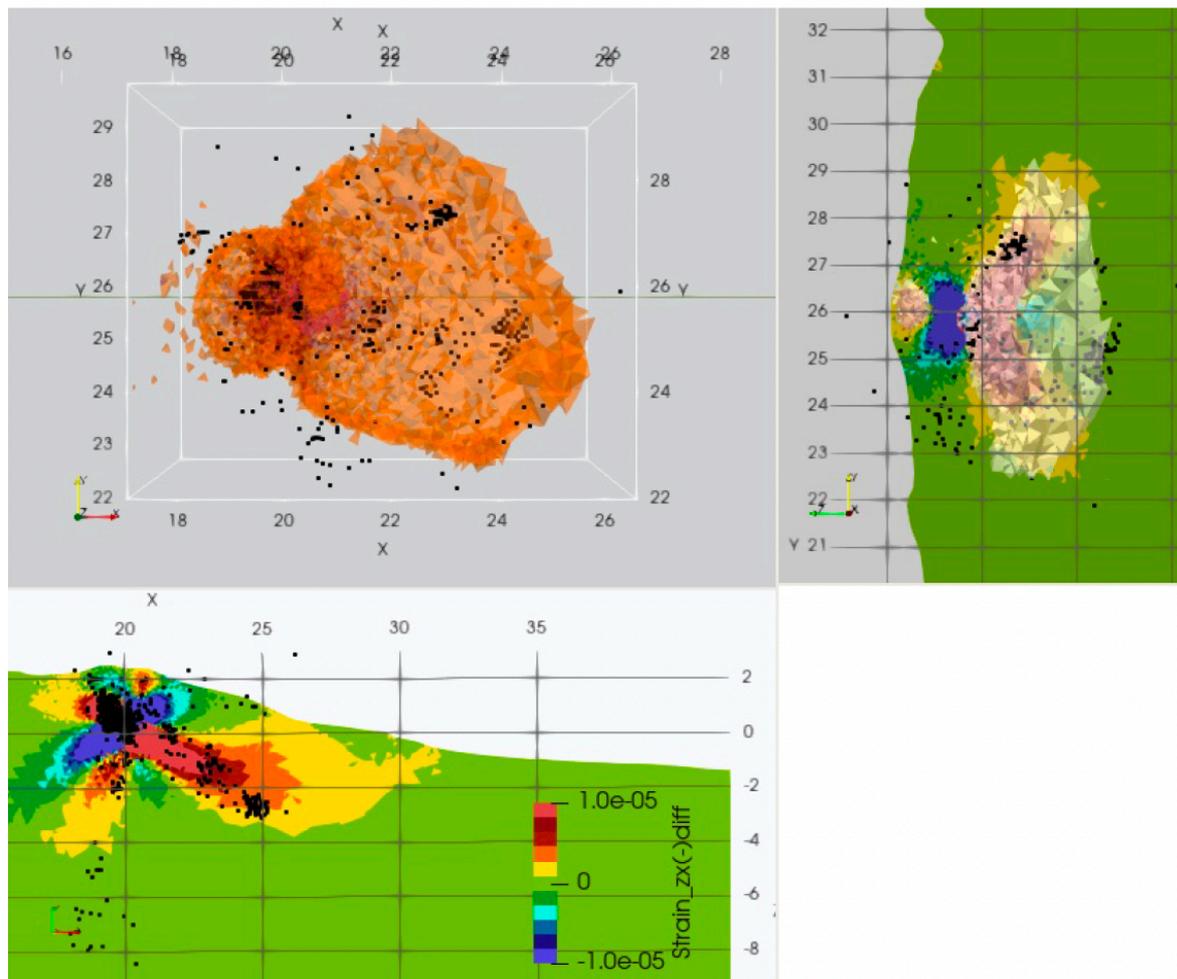


Figure 82 : Contraintes cisillantes résultats d’une expérience numérique 3D de déformations élasto-plastiques du massif du Piton de La Fournaise. Ici, la surpression magmatique est due à un réservoir positionné sous le cratère Dolomieu, au niveau de la mer. En haut à gauche : iso-surface de la contrainte dans un plan horizontal du modèle. On note l’asymétrie de la déformation et sa forme ovoïde qui englobe la sismicité du flanc Est (points noirs $X > 21\text{km}$). En haut à droite : champ de contraintes vertical 2D, Nord-Sud, passant par le centre du cratère Dolomieu. Bas gauche : champ de contraintes vertical 2D, Ouest-Est, passant par le centre du cratère Dolomieu. On note la forme incurvée (domaine orange-jaune, $X > 21\text{km}$) de la déformation dans la direction E-W qui se superpose à la sismicité (points noirs $X > 21\text{km}$).

En termes de risques, les modèles montrent également que la déformation plastique se concentre sur les régions du haut des Rivières Langevin, des Remparts et de l’Est, en raison des fortes pentes topographiques, ce qui font d’elles des zones enclines aux effondrements comme observé dans le passé (150 000 et 300 000 pour Langevin et les Remparts) et actuellement (effondrements récurrents sur la Rivière de l’Est). Les modèles montrent aussi la présence en surface de zones radiales de cisaillement qui peuvent expliquer l’orientation de certains axes principaux des fissures éruptives observées. Enfin, l’absence de déformations verticales ascendantes (surrections) significatives observées et modélisées et de résurgence superficielle de l’activité sismique en base et le long des grandes pentes Est du volcan nous font conclure que cette sismicité persistante n’est pas indicatrice d’un glissement de flanc imminent.

2 Projets européens

L'IPGP et notamment l'OVPF est impliqué dans quatre projets européens qui ont débuté ou se sont poursuivis en 2021 :

. 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

[Amendement du projet en date du 24 Novembre 2021 pour que le projet soit rattaché à l'IPGP suite à la mutation de Zacharie Duputel à l'OVPF-IPGP]

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)

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 pendant la première année du projet Interreg « Hatari » (2021)

WPO Coordination :

- Visite de l'Institut de Physique du Globe de Paris et de la Salle de Gestion de Crise à l'IPGP par la Direction du CNDRS et de l'OVK ;
- Signature de la première convention cadre entre l'IPGP et le CNDRS (cf. section IX.5) ;
- Présentation du projet Hatari à l'Ambassadeur des Comores à Paris ;
- Rencontres de travail avec les services administratifs de l'IPGP ;

WP1 Tectonique :

Du fait du contexte pandémique, les actions principales prévues pour l'année 1 (missions de terrain) ont été reportées en année 2.

WP2 Géophysique :

- Finalisation de l'acquisition et validation des capteurs géophysiques réceptionnés (sismomètres ; GNSS) à l'OVPF ;

RAPPORT ANNUEL OVPF - IPGP – 2021

- Finalisation de la commande des 4 stations prévues dans le cadre du projet pour envoi et installation aux Comores en début année 2 ;

WP3 Géochimie :

- Préparation des minéraux des produits éruptifs de la Grande Comore pour isotopie gaz rare et pour analyse nanoSIMS ;
- Finalisation de la production de nouveaux réservoirs en acier pour l'échantillonnage des fluides ;
- Commande de la station de mesure des émissions de CO₂ par le sol ;
- Embauche d'un post-doc ;
- Embauche d'un stagiaire niveau M2 (IPGP) pour travailler sur l'analyse couplée des signaux géochimiques et géophysiques en collaboration avec le post-doc Hatari ;

WP4 hydrothermalisme :

- Tests et formation analyses des fluides volcaniques par gaz chromatographie portable (micro-GC)
- Achat et tests sur le terrain des stations thermiques Madgetech ;

WP5 Dynamismes éruptifs :

- Embauche d'un stagiaire niveau M2 (CNDRS) pour étude comparative des éruptions Singani et Piton de la Fournaise 1977 et contribution à l'élaboration du plan ORSEC « Volcan » pour les Comores.
- Embauche de F. Lötter (Université de La Réunion) sur bourse doctorale de la Région Réunion pour l'étude de l'activité volcanique récente aux Comores.

WP6 Formation :

- Formation (2 semaines) de deux agents du CNDRS/OVK au paramétrage et maintenance des systèmes de surveillance géophysique et à la manipulation des outils d'analyse de données sismiques.

WP7 Communication :

- Communication concernant la signature de la première convention cadre entre l'IPGP et le CNDRS (cf. section IX.5) ;
- Organisation des journées de bilan de l'année 1 du projet et du jumelage entre les écoles de Sainte Rose (La Réunion) et Singani (Grande Comore), en collaboration avec la Cité du Volcan.

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

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

Dans le cadre de ce projet (se terminant en 2021), l'OVPF était une infrastructure d'accueil (accès transnational, TNA) permettant l'accueil de chercheurs européens. En 2021, deux projets avaient été retenus pour un accueil à l'OVPF :

. Projet TeRos pour tester un sismomètre rotationnel sur le Piton de la Fournaise – PI : E. Eibl – Université

de Potsdam, Allemagne.

. Projet Tephra pour caractériser les propriétés texturales et l'histoire thermique des produits issus des éruptions basaltiques explosives (avec le cas du Piton de la Fournaise) – PI : M. Colombier – Université Ludwig Maximilians, Allemagne.

Malheureusement du fait de la crise sanitaire liée à la pandémie de covid-19, les missions n'ont pas pu avoir lieu. Mais le sismomètre rotationnel a pu être envoyé à l'OVPF, il est désormais installé sur le massif du Piton de la Fournaise dans un tunnel isolé et des échantillons ont été envoyés pour le projet Tephra pour que les analyses puissent être faites.

3 Projets OMNCG OSU-Réunion

En 2021, l'OVPF a contribué à un projet financé par l'appel d'offre 2021 de l'OMNCG (Observations des Milieux Naturels et des Changements Globaux) de l'OSU-Réunion visant à financer des projets transversaux à caractère pluridisciplinaire.

. *Tomo-Piton – année 2* (porteur du projet : J. Van Baelen, LACy) – montant : 3 800 euros

Résumé : Depuis un peu plus de deux décennies, il a été démontré que les signaux GPS, sous certaines conditions et suivant des traitements spécifiques, détenaient une information fiable sur le contenu intégré de vapeur d'eau correspondant au passage des ondes satellites-récepteur GPS à travers l'atmosphère terrestre. De par leur continuité de mesure, insensible aux conditions météorologiques et leur bonne résolution temporelle, ces données ont un intérêt indéniable pour l'étude des situations météorologiques et sont également assimilées de façon routinière dans les modèles de prévision numérique du temps. De nos jours, les mesures de plusieurs centaines de stations en Europe et en Amérique du Nord sont régulièrement incorporées dans les bases de données des services météorologiques.

Par ailleurs, lorsqu'un réseau suffisamment dense de stations GPS existe, comme sur le Piton de la Fournaise, il est possible de mettre à profit l'entrelacement des multiples rais entre les différents satellites et les stations GPS pour restituer le champ tri-dimensionnel de vapeur d'eau par le biais de méthodes de reconstruction tomographique dans la région de l'atmosphère au-dessus du réseau d'observation.

L'objectif de ce projet est de tester l'application de méthodes de tomographie GPS pour la restitution du champ de vapeur d'eau sur la région du Piton de la Fournaise.

La vapeur d'eau est un élément important de la dynamique atmosphérique, fortement liée au développement convectif sur les reliefs tandis que sa distribution spatio-temporelle est extrêmement hétérogène, ce qui la rend fort complexe à mesurer et suivre dans le temps et l'espace. Un suivi par tomographie GPS est donc une opportunité unique pour mieux comprendre les processus engendrés sur les contreforts du Piton de la Fournaise. De même, la connaissance détaillée du champ de vapeur d'eau devrait être un atout indéniable pour les méthodes de correction d'imagerie et d'interférométrie SAR puisque la vapeur d'eau est la source d'incertitude la plus complexe à prendre en compte de par sa variabilité.

4 Projets IPGP

En 2021, l'OVPF a contribué à deux projets financés par l'appel d'offre IPGP 2021 visant à financer de petites opérations d'équipement et de recherche.

- Analyse de la sismicité volcanique à partir de mesures DAS (PI : L. Retailleau) : projet sur l'analyse des signaux enregistrés sur fibre optique à Mayotte en octobre 2020 pour étudier la capacité des mesures de Distributed Acoustic Sensing pour la surveillance et l'étude du volcan – montant 10 000 euros.

- Acquisition d'un fluxmètre portable pour la mesure des flux de CO₂ et de CH₄ dans le sol (PI : A. Di Muro). Cet appareil servira aux mesures ponctuelles des flux de gaz du sol (essentiellement du CO₂) à La Réunion et à Mayotte – montant : 40 000 euros.

5 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. Malheureusement, en 2021, tout comme en 2020, compte tenu de la situation sanitaire liée au covid-19, aucun échange n'a eu lieu.

Échanges avec l'Observatoire Volcanologique du Karthala (OVK, Grande Comore)

Depuis 40 ans, l'Institut de Physique du Globe de Paris et l'Université de la Réunion collaborent avec le CNDRS pour l'étude et la surveillance des aléas telluriques aux Comores. La Convention Cadre (dernier avenant : 28/07/1998) signée entre le CNDRS, l'IPGP et l'Université de la Réunion définit les domaines de coopération et échange en matière de recherche, enseignement, formation du personnel, suivi et caractérisation des risques naturels aux Comores. Dans ce cadre, l'Observatoire Volcanologique du Piton de la Fournaise, l'Observatoire Volcanologique du Karthala (OVK) et le Laboratoire Géosciences Réunion (LGSR) œuvrent à l'amélioration continue des réseaux de mesure nécessaires au suivi de l'activité sismo-volcanique aux Comores et mènent des recherches conjointes pour caractériser les processus en œuvre et minimiser les effets des aléas telluriques.

Malgré l'absence de mission technique (OVPF vers OVK ou inversement) compte tenu de la situation sanitaire liée au covid-19) en 2021, la collaboration entre les deux observatoires se poursuit. Les moyens techniques mis en œuvre les années précédentes et les méthodologies de télémaintenance portent leurs fruits.

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.

Pour fortifier ce partenariat, un projet de programme Interreg a débuté en mars 2021 (cf. section IX.2) 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.



Figure 83 : Signature du nouveau protocole d'accord entre l'IPGP et le CNDRS le 15 novembre 2021 (© IPGP).

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.

X Sollicitations médias et interventions grand public

1 Sollicitations médiatiques

Du fait du grand nombre de jours d'éruptions au Piton de la Fournaise en 2021, l'OVPF a fait l'objet une fois encore, d'une grande couverture médiatique tout au long de l'année, avec :

- d'innombrables (100^{aines}) interventions dans les médias (TV, radio et presse écrite) locaux, nationaux (parmi lesquels TF1, France télévision, France inter) et internationaux lors des éruptions, avec jusqu'à plusieurs dizaines de sollicitations par jour en début d'éruption et des interventions quotidiennes tout le long des éruptions dans les médias locaux (parmi lesquels Antenne Réunion, Réunion Première TV, RTL Réunion, Réunion Première radio, Radio Freedom, Le Journal de l'île 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 :

- de nombreuses interventions concernant l'activité sismo-volcanique à Mayotte,
- des interventions concernant l'activité volcanique en Islande ou à la Palma,
- de nombreuses sollicitations pour des reportages et des émissions grand public sur le volcanisme, le Piton de la Fournaise, ou l'observatoire, sur de grandes chaînes nationales et internationales à grande audience parmi lesquelles :

- . France Inter : « Une semaine dans leurs vies - Les gardiens du Volcan de la Fournaise ! » (diffusion 1-5 février 2021)
- . France 2 : 13h15 le dimanche (diffusion le 7 mars 2021)
- . France 3 : Témoins d'outre-mer (diffusion le 14 avril 2021)
- . TV5 Monde Info : reportage dans le JT (diffusion le 17 avril 2021)
- . France 3 : « Monde de Jamy – quand nos volcans se déchaînent » (diffusion le 6 octobre 2021)
- . RTS La première : Reportage dans l'émission CQFD (diffusion le 2-3 novembre 2021)
- . France 2 : reportage dans le JT de 20h (diffusion le 7 novembre 2021)
- . TF1 : reportage dans le JT de 20h (diffusion le 22 décembre 2021)



Figure 84 : Jamy Gourmaud en tournage fin 2020 au Piton de la Fournaise et à l'OVPF pour son émission « Le monde de Jamy – quand nos volcans se déchaînent » diffusée le 6 octobre 2021 (©OVPF-IPGP).

2 Interventions grand public

Compte tenu de la situation sanitaire et des restrictions liées à la pandémie de covid-19, le nombre d'interventions grand public des membres de l'OVPF en 2021, tout comme en 2020, a été limité.

Néanmoins les membres de l'OVPF ont continué de participer régulièrement au cycle de conférences organisé par la Cité du volcan un samedi après-midi par mois, ainsi qu'à des rencontres informelles avec le public dans l'observatoire virtuel du musée, notamment dans le cadre de la fête de la science, dans le respect des gestes barrières.

En 2021, trois conférences ont été animées par des membres de l'OVPF (Figure 85) :

- . 20/02/2021 – *Gestion d'une éruption au Piton de la Fournaise lors du confinement lié au covid-19* - Aline Peltier
- . 12/06/2021 – *L'apport des drones en volcanologie, au Piton de la Fournaise* - Christophe Brunet, Frédéric Lauret, Nicolas Villeneuve
- . 13/11/2021 – *L'activité éruptive et intrusive de 2021 au Piton de la Fournaise* et présentation des livrets sur l'historique des éruptions au Piton de la Fournaise – Aline Peltier, Nicolas Villeneuve



Figure 85 : Participation de l'OVPF aux conférences grand public organisées par la Cité du volcan. A gauche le 13/11/2021, à droite lors de la fête de la science le 5/11/2021 (© Cité du volcan et OVPF-IPGP).

A cela s'ajoute la participation de l'OVPF à la journée d'acculturation de la gendarmerie :

- . 23/09/2021 – *Le Piton de la Fournaise : les risques associés, les mesures préventives et la gestion de crise* - Aline Peltier

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,

. « **Sismo 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.

3 Réseaux sociaux et site web

Depuis 2018, l'OVPF dispose de nouveau d'un compte Twitter et Facebook. Ces comptes sont consultables aux adresses suivantes :

. <https://twitter.com/obsfournaise>

. <https://www.facebook.com/ObsVolcanoPitonFournaise/>

Après un peu moins de quatre ans d'existence (ou de réactivation pour le compte Twitter), les réseaux Twitter et Facebook de l'OVPF comptent respectivement 5648 et 27487 abonnés (chiffres janvier 2021). La moyenne des portées des publications est d'environ 50 000 interactions, avec des pics à plus de 500 000 lors des débuts d'éruption.

Ces réseaux sociaux viennent compléter la page actualité de l'OVPF où les bulletins d'activité sont régulièrement mis en ligne. L'OVPF émet quotidiennement un bulletin d'activité relatif aux observations de la veille.

. http://volcano.ipgp.fr/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 :

. <http://www.ipgp.fr/fr/ovpf/actualites-ovpf>

. <http://www.ipgp.fr/fr/ovpf/observatoire-volcanologique-piton-de-fournaise>

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

. <http://www.ipgp.fr/en/ovpf/volcanological-observatory-of-piton-de-fournaise>

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

En 2021, ce lien a été visionné 160 634 fois pour un temps moyen de 3 min 04 sur la page (données IRT).

4 Livrets « Historique des éruptions du Piton de la Fournaise »

Deux livrets - une réactualisation du livret « *Historique des éruptions du Piton de la Fournaise, 1998-2007* » et une extension aux éruptions récentes « *Historique des éruptions du Piton de la Fournaise, 2008-2017* », ont été imprimés en 2021. Ce projet de livrets a été réalisé en collaboration avec la Cité du volcan, dans le cadre de l'accueil d'une stagiaire, Mathilde Courtes en 2018, étudiante à l'École supérieure des Arts et industries graphiques Estienne. La présentation de ces livrets au grand public a été faite lors d'une conférence à la Cité du volcan le 13 novembre 2021 (Figure 86). Ces livrets sont désormais en vente à la Cité du Volcan.

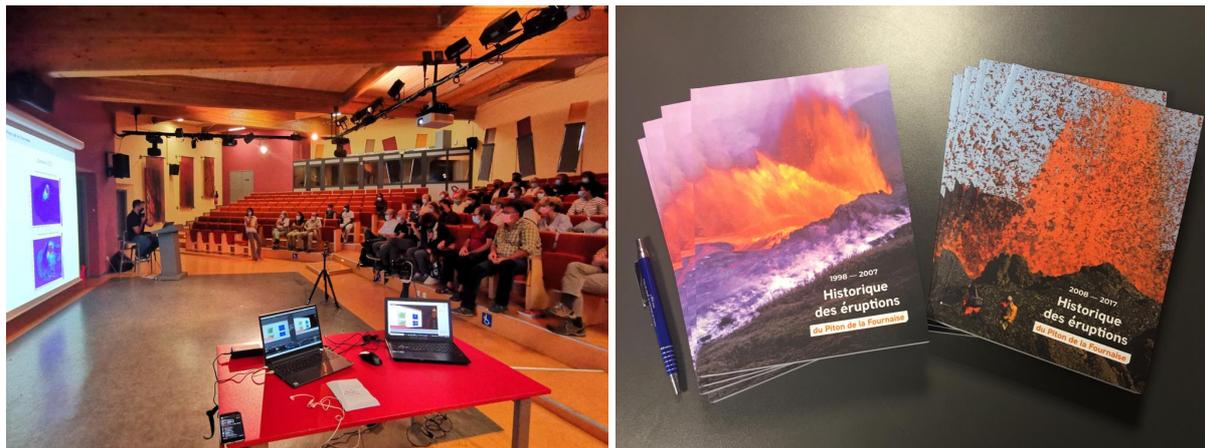


Figure 86 : Conférence de présentation des livrets sur l'histoire des éruptions à la Cité du volcan le 13 novembre 2021 (© Cité du volcan).

5 Visite officielle

Dans le cadre de sa visite officielle à l'île de la Réunion (du 19 au 22 novembre 2021), Frédérique Vidal, ministre de l'Enseignement supérieur, de la Recherche et de l'Innovation, s'est rendue le 20 novembre à l'OVPF (Figure 87). Cela a été l'occasion pour l'OVPF de présenter ses missions et les enjeux de la surveillance volcanologique pour le territoire réunionnais mais aussi mahorais avec les actions du REVOSIMA. L'équipe de l'observatoire a également pu présenter les travaux de recherche en volcanologie menés au sein de l'OVPF et de l'université de la Réunion et leur bénéfice pour la population et le territoire. À l'issue de cette visite, Frédérique Vidal a annoncé que l'État s'associera aux collectivités pour accompagner la reconstruction de l'observatoire, devenu trop exigu et vieillissant pour mener à bien ses missions.



Figure 87 : Visite officielle des locaux de l'OVPF par Mme la ministre de l'enseignement supérieur, de la recherche et de l'innovation, Frédérique Vidal, le 20 novembre 2021 (© Serge Marizy).

XI Implications de l'OVPF dans le suivi de l'activité à Mayotte

Depuis le début du mois de mai 2018, une activité sismique affecte 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 à 50 km à l'est de Mayotte qui a formé un édifice d'au moins 800 m de hauteur sur le plancher océanique situé à 3500 m sous la surface.

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

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

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

La mission de surveillance de cette zone volcanique a été confiée par le cabinet du Premier Ministre et les ministères concernés à l'IPGP, afin qu'il mette en place ce Réseau de surveillance volcanologique et sismologique de Mayotte (REVOSIMA). L'Institut de physique du globe de Paris opère le REVOSIMA à travers l'Observatoire volcanologique du Piton de la Fournaise (OVPF-IPGP) en co-responsabilité avec le BRGM et sa direction régionale à Mayotte et en étroite association avec l'IFREMER et le CNRS. Le REVOSIMA est soutenu par un consortium scientifique qui inclut l'ITES et le RENASS-BCSF, l'IRD, l'IGN, l'ENS, l'Université de Paris, l'Université de la Réunion, l'Université Clermont Auvergne et l'OPGC, l'Université de Strasbourg,

l'Université Grenoble Alpes et ISTERre, l'Université Paul Sabatier, Toulouse et le GET-OMPlé GET-OMP, GéoAzur, le CNES, Météo France, le SHOM et les TAAF.

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 1^{er} février 2020, ce réseau est opéré par l'OVPF-IPGP. Ainsi,

- la direction de l'OVPF-IPGP a un rôle de coordination à l'échelle nationale avec les scientifiques de différents instituts nationaux impliqués dans le REVOSIMA, notamment lors des réunions hebdomadaires du comité scientifique et technique du REVOSIMA ;
- les protocoles et routines en place à l'OVPF pour la surveillance du Piton de la Fournaise ont ainsi été étendus aux données du réseau en place à Mayotte ;
- les astreintes concernant le REVOSIMA ont été mutualisées à celles de l'OVPF ;
- un protocole a été mis en place avec les différents partenaires, notamment le BRGM de Mayotte et les préfetures 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.

11.1. Surveillance H24 de l'activité sismo-volcanique de Mayotte

La mise en place de protocoles et de routines mutualisés avec ceux existant pour le Piton de la Fournaise a permis le suivi opérationnel de l'activité sismo-volcanique de Mayotte grâce aux réseaux de stations de surveillance à terre (Figures 88 et 89).

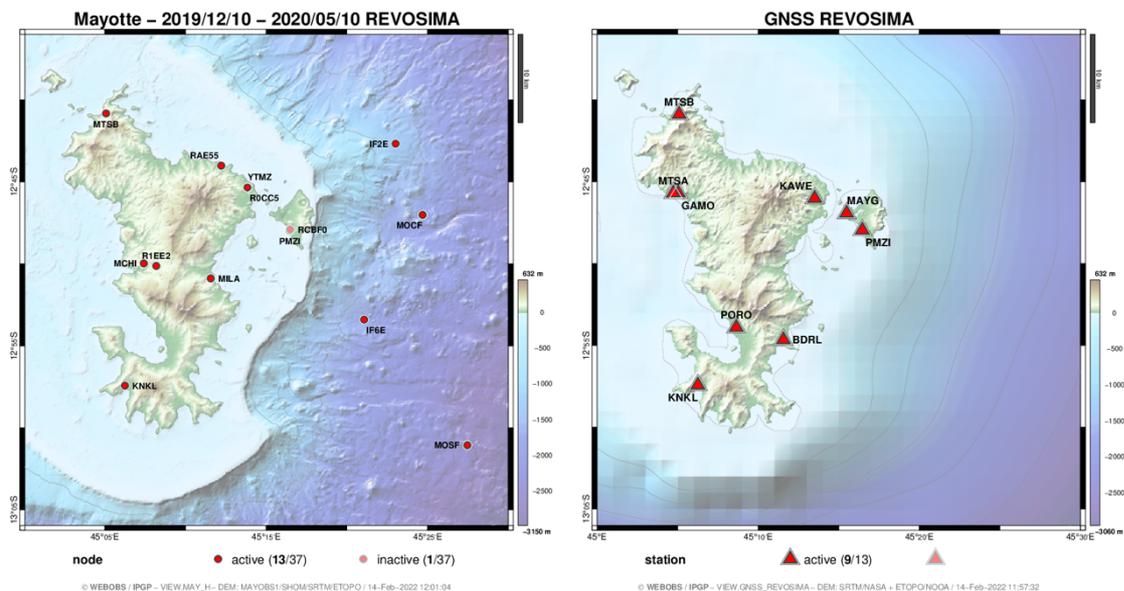


Figure 88 : Cartes de localisation (à gauche) des sismomètres et (à droite) des GPS à Mayotte.

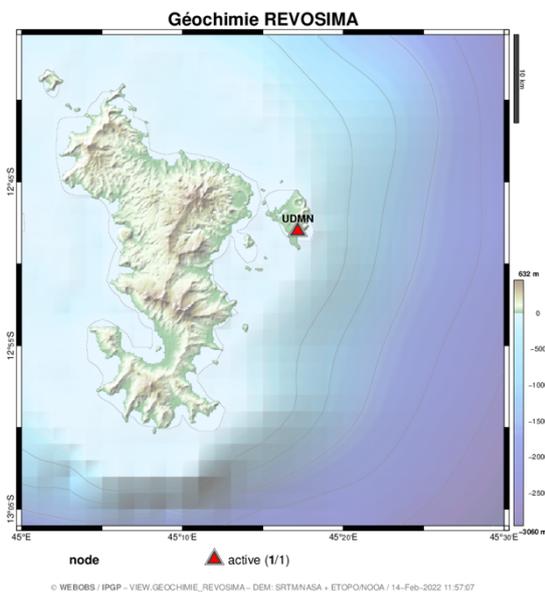


Figure 89 : Carte de localisation de la station CO₂ sol à Mayotte.

Sismicité :

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

L'activité sismique 2021 à Mayotte a été plus faible que les deux années précédentes. Au cours de l'année 2021 le nombre de séismes a progressivement diminué, avec une moyenne de 10 évènements par jour fin 2021. Cinq séismes ont été ressentis par la population de Mayotte. L'OVPF, en association avec le BRGM de Mayotte, applique à chacun d'eux un protocole permettant d'informer les autorités, ainsi que la population avec la diffusion d'un bulletin exceptionnel.

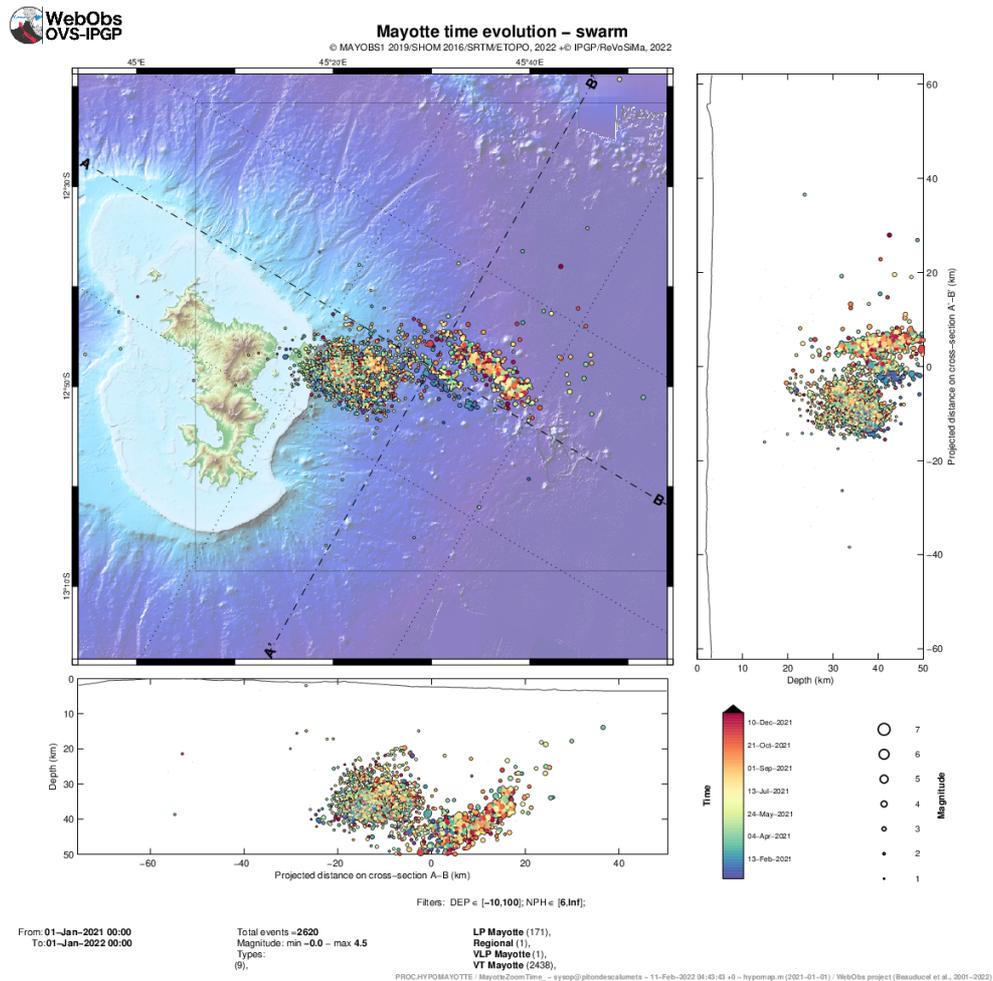


Figure 90 : Carte des épacentres (± 5 km) des séismes localisés avec les réseaux sismiques à terre (IPGP-IFREMER-CNRS-BRGM-BCSF-RéNaSS, ITES) en 2021 (échelle temporelle de couleur). Sont aussi représentées une projection des hypocentres des séismes le long de coupes transverses et axiales le long de la ride montrant la localisation estimée en profondeur (la précision varie entre +5 km et +15 km) des séismes en fonction de la magnitude (taille des symboles et de la date (échelle temporelle de couleur)). La localisation approximative des panaches acoustiques identifiés pendant les campagnes océanographiques (MD220-MAYOBS1, MD221-MAYOBS2, MD222-MAYOBS3, MD223-MAYOBS4, MAYOBS15) et dont la nature hydrothermale et/ou magmatique reste à préciser, est indiquée par des triangles jaunes, l'étoile rouge indique le site éruptif nouvellement identifié le 16 mai 2019, l'étoile orange la zone des coulées émises entre le 18/05/2019 et le 17/06/2019 et l'étoile jaune la zone des coulées émises entre juillet 2019 et le 20/10/2020. Les stations sismiques du réseau terrestre, les sismomètres fond de mer (OBS) et les stations de positionnement par satellite GPS sont indiquées par des symboles (voir légende). (©OVPF-IPGP, BRGM, IFREMER, CNRS, BCSF-RéNaSS, ITES / REVOSIMA).

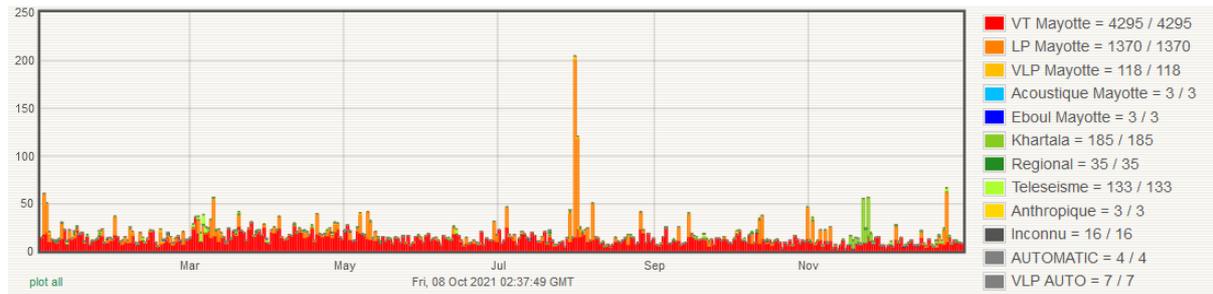


Figure 91 : Histogramme de la sismicité à Mayotte en 2021.

La localisation manuelle des séismes détectés automatiquement est effectuée par un groupe composé de 9 agents de l'IPGP (7 basés à l'OVPF et 2 basés à Paris) et un agent du BRGM Mayotte.

Une méthode de détection et de localisation opérationnelle de la sismicité a été développée et implémentée sur le Webobs depuis mars 2021 afin de faciliter le travail des personnels d'astreintes pour l'identification des séismes. Une alerte séisme fort a aussi été développée.

Enfin, le groupe « sismologie » du REVOSIMA se réunit régulièrement afin d'analyser ensemble la sismicité enregistrée par les stations fond de mer (qui sont remontées tous les 4 à 6 mois environ). Ces événements, appelés pickathon, sont réalisés en présentiel ou en distanciel et ont pour but de compléter les catalogues construits au jour le jour à partir des seuls enregistrements continus des stations à Terre.

Déformations :

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 1^{er} 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 92). A noter que vers avril-mai 2019, un premier ralentissement des déplacements a été observé. Depuis 2020 les déplacements ont de nouveau ralenti et depuis mars 2020 la subsidence est devenue négligeable sur certaines stations GPS. Enfin depuis fin 2020, il n'y a plus de cohérence dans les signaux de déformation qui sont devenues trop faibles et qui ne sortent pas du bruit ; il n'y a plus de signaux interprétables sans équivoque.

Compte tenu des faibles déplacements actuels, les données sont de plus en plus influencées par des effets de charges de surface induites par l'hydrologie et la dynamique atmosphérique à grande échelle. La modélisation des déformations horizontales et verticales sur la période 2002-2018, basée sur les données mensuelles issues de la mission gravimétrique GRACE (calcul IGN ; Chanard et al., 2018) montrent des fluctuations de l'ordre de 2 mm en horizontal et de l'ordre de 1 cm en vertical pic à pic sur des périodes de 12, 6 et 3 mois). Par conséquent, les fluctuations des déplacements actuels sur ces échelles de temps doivent être interprétées avec prudence.

Des calculs automatiques et journaliers ont été mis en place à l'IPGP (via les logiciels GipsyX et Webobs ; Beauducel et al., 2010 ; 2020) afin de suivre ces déplacements et de modéliser une source de déformation en temps-réel (Beauducel et al., 2014 ; 2020). 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.

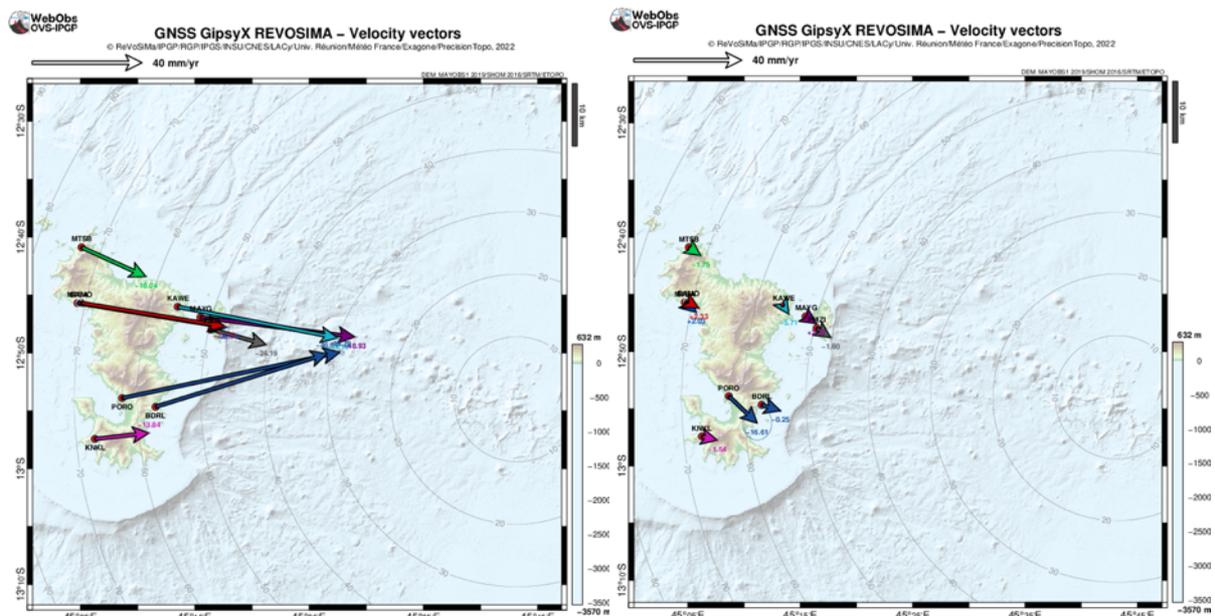


Figure 92 : Déplacements du sol enregistrés sur les stations GPS de Mayotte entre le 1er juillet 2018 et le 31 décembre 2021 (à gauche) et en 2021 (à droite). Les déplacements horizontaux sont représentés sous forme vectorielle et les déplacements verticaux sont indiqués par les valeurs chiffrées en couleur. Post-traitement de ces données réalisé par l’IPGP (©OVPF-IPGP / REVOSIMA).

Flux de CO₂ sol :

Dans le cadre du suivi de l’activité sismo-volcanique à Mayotte, la station PNRN a été installée à Petite Terre (station UDMN) en novembre 2020. La station CO₂, UDMN, installée au sein de l’usine de dessalement, a fonctionné presque en continu, bien qu’ayant connu des pannes en novembre 2020, en mai et décembre 2021. L’analyse préliminaire des données suggère que les mesures de CO₂ sur ce site sont influencées par les cycles de marées et, à l’échelle saisonnière, par l’évolution de la température et de la pression (Figure 93).

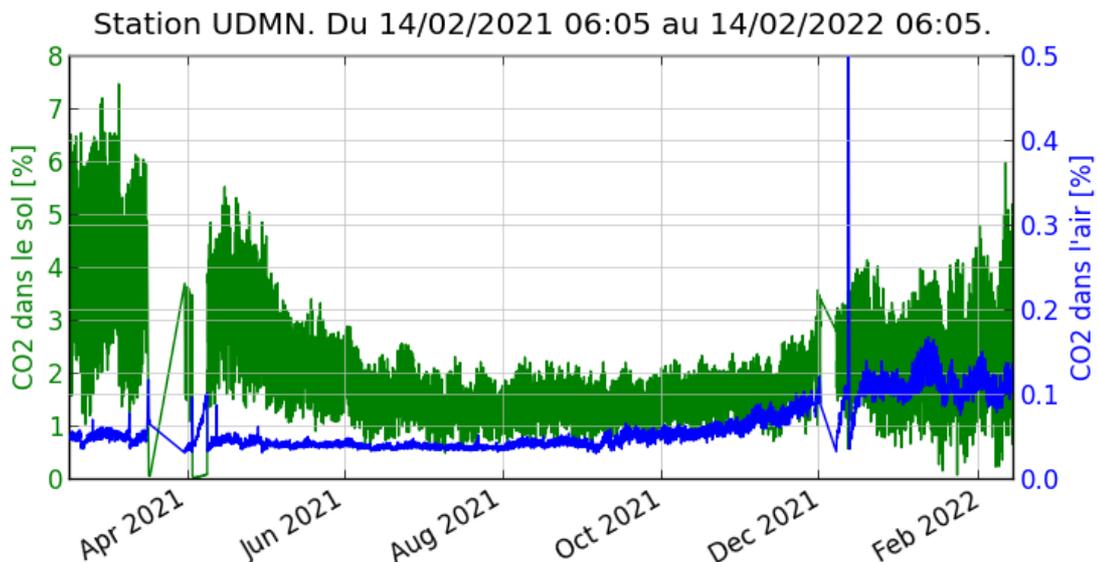


Figure 93 : Évolution annuelle des concentrations en CO₂ dans le sol (vert) et dans l'air (bleu) au niveau de la station UDMN (Petite Terre).

La valise portable MultiGaS a été aussi utilisée lors de missions de septembre et décembre 2021 à Petite Terre (Mayotte) pour la mesure des concentrations en espèces sulfurées (H₂S, SO₂) et en CO₂ dans l'air près des deux sites de bullage de l'Estran de l'aéroport et du Dziani.

Le suivi des émissions au niveau de l'estran a confirmé l'absence de SO₂ dans les émissions hydrothermales de Petite Terre et que le H₂S, détecté pour la première fois en 2019, au début de la crise sismo-volcanique, est maintenant à nouveau au-dessous du seuil de détection.

La caractérisation des concentrations en air au niveau du lac Dziani Dzaha a été effectuée en vue d'un possible suivi en continu (Figure 94). Les mesures réalisées en décembre 2021 indiquent que les bullages sud et central pourraient être associés à des quantités de H₂S bien au-dessus du seuil de détection. Par contre, les tests effectués suggèrent que le suivi en continu des émissions de H₂S au sein du Dziani par capteur électrochimique pourrait s'avérer compliqué par i) les possibles interférences entre VOSC (Volatile Organic Sulfur Compounds) d'origine biologique et H₂S et ii) la forte dérive instrumentale liée à la température.

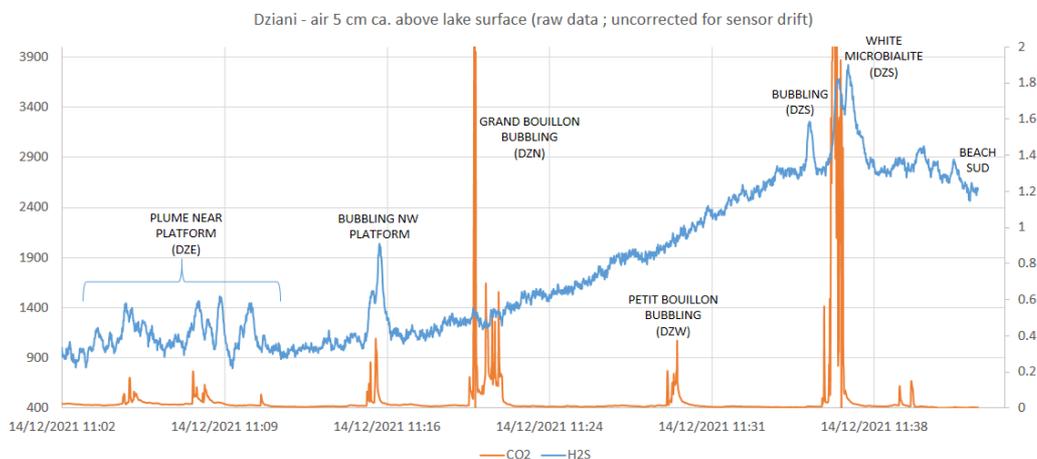


Figure 94 : Concentrations en CO₂ et H₂S dans l'air près de la surface du lac Dziani Dzaha (14/12/2021). Les zones de bullage sont identifiées par les fortes augmentations en CO₂.

11.2. Campagnes en mer

En 2021, le personnel de l'OVPF a participé aux campagnes en mer réalisées dans le cadre du REVOSIMA.

Participation de deux ingénieurs et une chercheuse (MAYOBS18 et 19) de l'OVPF aux missions en mer suivantes :

- MAYOBS18 (12j), MAYOBS21 (20j) : récupération des OBS par envoi de commandes acoustiques, mesure de dérive d'horloge et extraction des données brutes, réparations de balises radio VHF et flash, redéploiement des OBS, participation aux quarts.
- MAYOBS19 : carottage.
- MAYOBS18 : remplacement des batteries datalogger, largeur acoustique et balises.
- MAYOBS21 : surveillance des animaux marins pour leur protection contre les émissions des instruments de mesures du bateau. Suite à l'extraction des données, réalisation de leurs traitements, de la génération du mini-SEED et de la livraison.
- MAYOBS22 : phase préparatoire pour la recherche de fournisseur pour les consommables, visite de navire afin de valider la faisabilité d'une mission OBS.
- Visualisation des données brutes extraites des OBS, vérification des données et application de correction si nécessaire, production des données au format mini-SEED à partir des données brutes corrigées.

Observations majeures réalisées lors des campagnes 2021 : les émissions de lave sur le site éruptif, les campagnes en mer de surveillance MAYOBS18 (du 09 au 13 avril 2021) et MAYOBS19 (du 27 mai au 01 juin 2021) montrent qu'aucune évolution morphologique majeure n'a été mise en évidence dans la zone des coulées au nord-ouest du nouveau volcan en 2021. Lors de la campagne MAYOBS21, qui s'est déroulée du 13 septembre au 04 octobre 2021, de nouveau, il n'a pas été mis en évidence la présence de nouvelles coulées de lave dans la zone nord-ouest du volcan.

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>

XII Publications dans des revues scientifiques internationales de rang A

1 Publications dans des revues scientifiques internationales de rang A

Les données présentées dans ce rapport ont fait l'objet de travaux de recherche dont les résultats ont été publiés dans des revues scientifiques internationales spécialisées. En 2021, les membres de l'équipe de l'OVPF ont ainsi participé à la production de 20 publications dans des revues scientifiques internationales de rang A.

Liste des publications 2021 :

- Arellano, S. et al. (2021), Synoptic analysis of a decade of daily measurements of SO₂ emission in the troposphere from volcanoes of the global ground-based network for observation of volcanic and atmospheric change, *Earth System Science Data*, 13, 1167-1188.
- Berthod, C., A. Médard, A. Di Muro, T. Hassen Ali, L. Gurioli, C. Chauvel, J.C. Komorowski, P. Bachèlery, A. Peltier, M. Benbakkar, J.L. Devidal, P. Besson, A. Le Friant, C. Deplus, S. Nowak, I. Thinon, P. Burckel, S. Hidalgo, N. Feuillet, S. Jorry, Y. Fouquet (2021), Mantle xenolith-bearing phonolites and basanites feed the active volcanic ridge of Mayotte (Comoros archipelago, SW Indian Ocean), *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 176 :75, <https://doi.org/10.1007/s00410-021-01833-1>.
- Berthod, C., E. Médard, P. Bachèlery, L. Gurioli, Andrea Di Muro, A. Peltier, J.C. Komorowski, M. Benbakkar, J.L. Devidal, J. Langlade, P. Besson, G. Boudon, E. Rose-Koga, C. Deplus, A. Le Friant, M. Bickert, S. Nowak, I. Thinon, P. Burckel, S. Hidalgo, M. Kaliwoda, S. Jorry, Y. Fouquet, N. Feuillet (2021), The 2018-ongoing Mayotte submarine eruption: magma migration imaged by petrological monitoring, *Earth and Planetary Science Letters*, 571, 117085, <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2021.117085>.
- Boudoire, G., A. Di Muro, L. Michon, N. Metrich (2021), Footprints and conditions of multistep alkali enrichment in basaltic melts at Piton de la Fournaise (La Réunion Island, Indian Ocean), *Bulletin of Volcanology*, 83(12), 1-31.
- Caballero, E., A. Chounet, Z. Duputel, J. Jara, C. Twardzik, R. Jolivet (2021), Seismic and aseismic fault slip during the initiation phase of the 2017 Mw=6.9 Valparaíso earthquake, *Geophys. Res. Lett.*, v. 28, pp. e2020GL091916.
- Chevrel, M.O., M. Favalli, N. Villeneuve, A.J.L. Harris, A. Fornaciai, N. Richter, A. Derrien, P. Boissier, A. Di Muro, A. Peltier (2021), Lava flow hazard map of Piton de la Fournaise volcano, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 21, 2355–2377, 2021, <https://doi.org/10.5194/nhess-21-2355-2021>.
- Colombier, M., J. Vasseur, B. Houghton, F. Caceres, B. Scheu, U. Kueppers, L. Gurioli, S. Thivet, C. Montanaro, A. Soldati, A. Di Muro, B.D. Dingwell (2021), Degassing and gas percolation in basaltic magmas, *Earth and Planetary Science Letters*, 573, 117134.

- Di Muro, A., F., Schwarzmüller, U. Küppers, M. Heap, DB. Dingwell (2021), Petrophysical characterization of volcanic ejecta to constrain subsurface lithologies: implications for the stability of Piton de la Fournaise volcano edifice (La Réunion island), *Volcanica*, vol. 4 (1), 41-66.
- Duputel, Z., V. Ferrazzini, O. Lengliné, L. Michon, F. Fontaine, F. Massin (2021), Seismicity of La Réunion island, *Comptes Rendus Géosciences*. doi: 10.5802/crgeos.77.
- Feuillet, N., S.J. Jorry, W. Crawford, C. Deplus, I. Thion, E. Jacques, J.M. Saurel, A. Lemoine, F. Paquet, C. Satriano, C. Aiken, O. Foix, P. Kowalski, A. Laurent, E. Rinnert, C. Cathalot, J.P. Donval, V. Guyader, A. Gaillot, C. Scalabrin, M. Moreira, A. Peltier, F. Beauducel, R. Grandin, V. Ballu, R. Daniel, P. Pelleau, J. Gomez, S. Besançon, L. Geli, P. Bernard, P. Bachelery, Y. Fouquet, D. Bertil, A. Lemarchand, J. Van der Woerd (2021), Birth of a large volcanic edifice through lithosphere-scale dyking offshore Mayotte (Indian Ocean), *Nature Geoscience*, <https://doi.org/10.1038/s41561-021-00809-x>.
- Gayer E., L. Michon, N. Villeneuve (2021), Volcanic island multi-stage construction inferred from a simple geometrical approach: Example of La Réunion Island, *Geomorphology*, 392, 107900. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2021.107900>
- Klein, E, B. Potin, E. Pasten-Araya, R. Tissandier, K. Azua, Z. Duputel, C. Herrera, L. Rivera, J.M. Nocquet, J.C. Baez, D. Zigone, R. Madariaga, J.P. Ampuero, S. Ruiz, C. Vigny (2021), Interplay of seismic and a-seismic deformation during the 2020 sequence of Atacama, Chile, *Earth Planet. Sci. Lett.*, v. 570, pp. 117081.
- Kuehnert, J., A. Mangeney, Y. Capdeville, J.P. Vilotte, E. Stutzmann, E. Chaljub, ... & F. Lauret (2021), Locating Rockfalls Using Inter-Station Ratios of Seismic Energy at Dolomieu Crater, Piton de la Fournaise Volcano, *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 126(4), e2020JF005715.
- Lengliné, O., Z. Duputel and P. G. Okubo (2021), Tracking dike propagation leading to the 2018 Kilauea eruption, *Earth Planet. Sci. Lett.*, v. 553, pp. 116653.
- Liuzzo, M., A. Di Muro, A.L. Rizzo, A. Caracausi, F. Grassa, N. Fournier, B. Shafik, G. Boudoire, M. Coltorti, M. Moreira, F. Italiano (2021), Gas Geochemistry at Grande Comore and Mayotte Volcanic Islands (Comoros Archipelago), *Indian Ocean, Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, <https://doi.org/10.1029/2021GC009870>.
- Moutote, L, D. Marsan, O. Lengliné and Z. Duputel (2021), Rare occurrences of non-cascading foreshock activity in Southern California, *Geophys. Res. Lett.*, v. 48, pp. e2020GL091757.
- Retailleau, L., GC. Beroza (2021), Towards structural imaging using seismic ambient field correlation artefacts, *Geophysical Journal International*, 225 (2), 1453-1465.
- Retailleau, L., L. Gualtieri (2021), Multi-phase seismic source imprint of tropical cyclones, *Nature communications* 12 (1), 1-8.
- Soltanmohammadi, A., M. Grégoire, F.J. Fontaine, LP. Bédard, M. Blanchard, M. Rabinowicz, M. (2021), Melt percolation, concentration and dyking in the Hawaiian mantle plume and overriding lithosphere: links to the evolution of lava composition along the volcanic chain, *Journal of Petrology*, 63(1), egab101.
- Wegner, K., F. Haas, T. Heckmann, A. Mangeney, V. Durand, N. Villeneuve, P. Kowalski, A. Peltier, M. Becht (2021), Assessing the effect of lithological setting, block characteristic and slope topography on the runout length of rockfalls in the Alps and on the La Réunion island, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 21, 1159-1177.

2 Congrès scientifiques nationaux et internationaux

En 2021, les membres de l'équipe de l'OVPF ont participé ou été associés à 14 présentations de congrès internationaux, qui pour la majorité se sont déroulés en distanciel compte tenu de la situation sanitaire liée à la COVID-19.

Liste des présentations aux congrès internationaux 2021 :

- Caballero E., Z. Duputel, C. Twardzik, E. Klein, H. Aochi, J. Jiang, C. Liang, L. Zhu, R. Jolivet, E. Fielding, M. Simons (2021), Revisiting the 2015 Mw=8.3 Illapel Earthquake. From Kinematic Rupture Inversion to Rupture Dynamics, Abstract S55D-0179, AGU Fall meeting, AGU, New Orleans and online.
- Calais, E. et al. (2021), Citizen seismology helps decipher the 2021 Haiti earthquake, Abstract S42C-03, AGU Fall meeting, AGU, New Orleans and online.
- Chevrel, O., M. Favalli, N. Villeneuve, A. Harris, A. Fornaciai, N. Richter, A. Derrien, P. Boissier, A. Di Muro, A. Peltier (2021), Lava flow hazard map of Piton de la Fournaise volcano, Geophysical Research Abstracts, vol. 23, Abstract EGU2021- 12266.
- Finizola A., J. Pedragosa, T. Biteau, P. Allard, JM. Berthezene, A. Bertil, F. Bonnardot, E. Cloppet, R. Gusset, G. Jumaux, F. Martel-Asselin, S. Narbaud, A. Pauvret, A. Peltier, L. Perrier, C. Poirot, T. Ricci, N. Villeneuve (2021), Eventos desastrosos ocurridos en abril 2021 en el Piton de la Fournaise, Isla de La Réunion (Francia). II Conferencia Internacional "Erupciones volcánicas: estrategias para la prevención y mitigación del riesgo volcánico, 17-19 Novembre 2021, Arequipa, Pérou.
- Journeau, C., N.M. Shapiro, A. Peltier, V. Ferrazzini, J. Soubestre, A. Di Muro, C.P. Jaupart (2021), Tracking changes in the co-eruptive tremor characteristics and associated magma degassing processes, application to Piton de la Fournaise, La Réunion, France, Abstract V23B-08, 2021 Fall Meeting, AGU, New Orleans and online.
- Lavayssière, A., L. Retailleau (2021), Evolution of the Volcano-Tectonic seismicity associated with Mayotte's active magmatic system, 5èmes Rencontres Scientifiques et Techniques Résif, Obernai.
- Mittal, T., L. Retailleau, J.S. Jordan, F. Beauducel, A. Peltier (2021) Mayotte 2018-2021 Eruption likely sourced from a magmatic mush, Abstract V43A-02, 2021 Fall Meeting, AGU, New Orleans and online.
- Moutote, L., O. Lengliné, Z. Duputel (2021), Analysis of the 2017 Valparaiso Earthquake Sequence, Abstract MR35B-04, 2021 Fall Meeting, AGU, New Orleans and online.
- Mutch, E.J.F., E.M. Newcombe, A. Di Muro, A. Peltier, P. Piccoli (2021) Pre-eruptive storage timescales of olivine-phyric magmas at Piton de la Fournaise, La Reunion, Abstract V35D-0167, 2021 Fall Meeting, AGU, New Orleans and online.
- Peltier, A. (2021), La pratique de l'expertise volcanologique en réseau constitution et fonctionnement des réseaux nationaux et transnationaux: le cas de l'OVPF, Colloque Droit et Volcanisme, Université de la Réunion, o line.
- Raimbault, B., R. Jolivet, E. Calais, Z. Duputel, Y. Fukushima (2021), Complex Fault Rupture Geometry and Slip Distribution of the Mw7.2 Nippes Earthquake, Abstract S42C-01, 2021 Fall Meeting, AGU, New Orleans and online.
- Retailleau, L. (2021), Machine learning appliqué à l'analyse de la sismicité de l'éruption à Mayotte, 5èmes Rencontres Scientifiques et Techniques Résif, Obernai.
- Retailleau, L., L. Gualtieri (2021), Multi-phase seismic source imprint of tropical cyclones, Abstract S35A-02, 2021 Fall Meeting, AGU, New Orleans and online.
- Saurel, JM., L. Retailleau, W. Zhu, S. Issartel, C. Satriano, P. Boissier, G. C. Beroza (2021), Implementation of a real-time seismicity detector for Mayotte crisis, Geophysical Research Abstracts, vol. 23, Abstract EGU21-10646.