



Bulletin mensuel

Institut de physique du globe de Paris

Réseau de surveillance volcanologique et sismologique de Mayotte - REVOSIMA

ISSN 2680 – 1205

Novembre 2023

Bulletin de l'activité sismo-volcanique à Mayotte

Évolution au cours du dernier mois

- Entre le 1^{er} et le 30 novembre, 776 séismes Volcano-Tectoniques (VT ; séismes dont la gamme de fréquence est la plus large, de 2Hz à 40Hz), 13 séismes Longue Période (LP ; basse fréquence, entre 0,5 et 5 Hz) et aucun séisme Très Longue Période (VLP ; très basse fréquence, entre 5 et 100 secondes) ont été détectés par le REVOSIMA. L'activité sismique principale est toujours concentrée à 5-15 km à l'est de Petite-Terre, à des profondeurs de 20-50 km.

- Depuis fin 2020, aucune déformation significative n'est enregistrée.

Évènement en cours : activité sismique en cours entre 5 et 50 km à l'Est de Mayotte et émissions de fluides sur la zone du Fer à Cheval. Dernière activité sous-marine observée au niveau du volcan Fani Maoré le 18/01/2021 lors de la campagne MAYOBS17. Arrêt probable de l'éruption. Aucune hypothèse n'est pour l'instant écartée quant à l'évolution de la situation à venir (arrêt définitif, reprise de l'activité éruptive sur le même site, reprise de l'activité éruptive sur un autre site), compte tenu de l'activité sismique persistante et d'émissions de fluides localisées dans la zone du Fer à Cheval qui étaient toujours présentes lors de la dernière campagne en mer MAYOBS22 réalisée en juillet 2022.

Fani Maoré : latitude : -12,9108712° ; longitude : 45,7118940° ; hauteur : 817 (± 10) m (données issues de mesures acoustiques réalisées en 2019 et 2020 par le REVOSIMA) ; profondeur à la base du site éruptif : -3404 (± 43) m

Volume de magma érupté en date d'octobre 2021 : environ 6,55 km³

Fer à Cheval : latitude : -12,823248° ; longitude : 45,384717° ; profondeur : env. -1500 m

Global Volcanism Report Smithsonian Institution, catalogue des volcans du monde : Mayotte : numéro 233005 ; <https://volcano.si.edu/volcano.cfm?vn=233005>

Veille scientifique renforcée





Bulletin mensuel – Novembre 2023

Réseau de surveillance volcanologique et sismologique de Mayotte

Ce bulletin représente une synthèse des observations, mesures, et conclusions préliminaires sur l'activité sismo-volcanique enregistrée par le Réseau de surveillance Volcanologique et Sismologique de Mayotte (REVOSIMA) qui s'appuie sur les données des stations de mesures à terre.

L'IPGP et le BRGM assurent la coordination et le pilotage du REVOSIMA. La surveillance opérationnelle de l'activité sismo-volcanique est réalisée par l'IPGP (OVPF) en co-responsabilité avec le BRGM et en étroite association avec l'IFREMER et le CNRS. Le REVOSIMA est soutenu par un consortium scientifique avec l'ITES (Institut Terre et Environnement de Strasbourg) et le RENASS-BCSF, l'IRD, l'IGN, l'ENS, l'Université de Paris, l'Université de la Réunion, l'Université Clermont Auvergne, LMV et l'OPGC, l'Université de Strasbourg, l'Université Grenoble Alpes et ISTerre, l'Université de La Rochelle, l'Université de Bretagne Occidentale, l'Université Paul Sabatier, Toulouse et le GET-OMP, GéoAzur, le CNES, Météo France, le SHOM, les TAAF, et collaborateurs. Les données de ce réseau sont produites par ce consortium de partenaires scientifiques financés par l'État.

Depuis le début de la crise en mai 2018, l'État adapte en continu, les mesures de surveillance et de prévention pour faire face à ce phénomène géologique exceptionnel qui impacte la population mahoraise et plus largement cette partie de l'océan indien.

Ce bulletin mensuel est distribué publiquement. Les informations dans ce bulletin sont à usage d'information, de pédagogie et de surveillance. Elles ne peuvent pas être utilisées à des fins de publications de recherche sans y faire référence explicitement et sans autorisation du comité de suivi de la surveillance du REVOSIMA. Les données sismiques sont distribuées par l'IPGP (Centre de données : <http://datacenter.ipgp.fr/> et <http://volobsis.ipgp.fr/data.php>) et par les Services Nationaux d'Observations du CNRS-INSU. Les données GPS sont distribuées par l'Institut National de l'Information Géographique et Forestière (IGN : <http://mayotte.gnss.fr/donnees>). Les données acquises lors des campagnes océanographiques seront distribuées par l'IFREMER, les autres données géologiques et géochimiques seront diffusées par le REVOSIMA et ses partenaires.

Un bulletin automatique préliminaire d'activité du REVOSIMA, relatif aux activités de la veille, validé par un.e analyste, est publié depuis le 17 mars 2020 quotidiennement. Il est accessible directement sur ce lien :
http://volcano.ipgp.fr/mayotte/Bulletin_quotidien/bulletin.html



Résumé détaillé

1. L'île volcanique de Mayotte est l'une des quatre îles de l'archipel volcanique des Comores, située dans le Canal du Mozambique entre Madagascar et l'Afrique. Depuis environ 20 millions d'années, le volcanisme sur Mayotte a produit une grande diversité de reliefs et de produits volcaniques. Les lithologies observées sont des empilements de coulées de basaltes, de néphélinites et de téphrites, des dômes phonolitiques et des dépôts pyroclastiques (Nehlig *et al.*, 2013). Les laves ont une composition chimique fortement alcaline pauvre en silice au sud (environ 10 Ma) et modérément sous-saturée en silice au nord (environ 4 Ma ; Debeuf, 2004, Pelleter *et al.*, 2014). L'activité volcanique s'est poursuivie au Quaternaire récent ($\leq 12\ 000$ ans) comme le montrent les morphologies volcaniques peu érodées au nord-est de Mayotte et sur Petite-Terre. Des éruptions explosives au nord-est de Mayotte et sur Petite-Terre ont produit de nombreux cônes de scories présents autour de Mamoudzou (Grande-Terre) et de Dzaoudzi, Labattoir, Pamandzi (Petite-Terre), et les maars (formés lors de l'interaction explosive entre l'eau de mer et le magma) et tuff-cones de Kavani et de Kawéni (Grande-Terre) et de Moya, La Vigie et Ndziani (Petite-Terre). Les dépôts pyroclastiques à cendres et ponces d'origine phréatomagmatique recouvrent des basaltes vacuolaires datés à 150 000 ans B.P. (Debeuf, 2004). La présence de niveaux de cendres volcaniques dans les sédiments datés du lagon, indiquerait que la dernière activité volcanique et explosive à terre aurait eu lieu avant 7305 ± 65 Cal BP (Zinke *et al.*, 2003 ; 2005) et probablement entre 4000 et 6000 ans (Zinke *et al.*, 2000). De nombreux cônes sous-marins sont présents également sur la pente insulaire de Mayotte (Audru *et al.*, 2006) et tout particulièrement le long d'une chaîne volcanique orientée NO-SE (Feuillet *et al.*, 2021).

2. L'archipel des Comores se situe dans une région sismique considérée comme modérée. Depuis mai 2018, la situation volcanotectonique a évolué. Une activité sismique affecte l'île de Mayotte depuis le début du mois de mai 2018 (Lemoine *et al.*, 2020). Ces séismes forment deux essaims avec des épacentres regroupés en mer, entre 5 et 15 km à l'est de Petite-Terre pour l'essaim sismique proximal (le plus proche de Petite-Terre, nommé précédemment essaim principal), et à 25 km à l'est de Petite-Terre pour l'essaim sismique distal (le plus éloigné de Petite-Terre et qui s'étend le long de l'alignement de cônes volcaniques jusqu'au site éruptif, nommé précédemment essaim secondaire), à des profondeurs comprises majoritairement entre 25 et 50 km. La majorité de ces séismes est de faible magnitude, mais plusieurs événements de magnitude modérée (max. $M_w 5.9$ le 15 mai 2018) ont été fortement ressentis par la population et leur succession a endommagé certaines constructions (rapport BCSF-RENASS juillet 2018). **Depuis juillet 2018, le nombre de séismes a diminué mais une sismicité continue persiste. Celle-ci fluctue mais peut toujours générer des séismes de magnitudes proches de M4 ressentis à terre ; le dernier datant du 31 août 2023 (ML 4.1). Du 1^{er} au 30 novembre 2023, 776 séismes Volcano-Tectoniques (VT), 13 séismes Longue Période (LP) et aucun séisme Très Longue Période (VLP) ont été détectés par le REVOSIMA.**

La majorité des séismes LP a eu lieu lors d'essaims de quelques dizaines de minutes, et souvent associé à des signaux VLP. Ces signaux LP et VLP sont habituellement associés dans la littérature à des résonances et des mouvements de fluide (magmatique ou hydrothermal).

3. Les déplacements de surface mesurés entre le 1^{er} juillet 2018 et fin 2020 par les stations GPS de Mayotte ont indiqué : a) un déplacement d'ensemble des stations GPS de Mayotte vers l'est d'env. 21 à 25 cm ; b) un affaissement (subsidence) d'environ 10 à 19 cm selon leur localisation sur l'île. Un ralentissement des déplacements a été observé en avril-mai 2019.

Depuis fin 2020 il n'y a plus de cohérence dans les signaux de déformation qui sont devenus trop faibles et ne sortent pas du bruit, il n'y a plus de signaux interprétables. Les premières modélisations simples, utilisant une source unique isotrope localisée en un point, montrent que les déplacements des premiers mois de la crise pourraient être induits par la déflation d'un réservoir magmatique profond à l'est de Mayotte (note Briole *et al.*, 2018 ; bulletins mensuels 2018 OVPF/IPGP ; Peltier *et al.*, 2022). Aux données à terre, se rajoutent les données des capteurs de pression A-0-A qui sont installées sur le fond océanique sur le site de la Couronne et sur le site de référence localisé au nord des sites actifs (nord-est de Petite-Terre sur la pente de Mayotte). L'analyse préliminaire des différences de pression mesurées par les deux capteurs sous-marins de pression A-0-A lors de la mission MD242-MAYOBS25 (11 au 28 septembre 2023) suggère :

**1) qu'il n'y a pas eu de déformation lente significative entre les deux sites distants d'environ 9,5 km (résidu $< \sim 0.5$ cm/an),
2) et qu'il n'y a pas eu de déformation transitoire pouvant correspondre à une activité de pulse magmatique ou de déformation tectonique, relative entre les deux sites. Si une déformation existe dans la zone, celle-ci affecte les deux sites de la même manière.**



4. Du 02 au 18 mai 2019, une campagne océanographique (MD220-MAYOBS1 ; *Feuillet, 2019*) sur le N/O 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 de profondeur d'eau. Les campagnes suivantes (MD221-MAYOBS2 - 10-17 juin 2019 ; MD222-MAYOBS3 - 13-14 juillet 2019 ; et MD223-MAYOBS4 - 19-31 juillet 2019 ; Levés Mayotte du SHOM sur le BHO Beautemps-Beaupré, SHOM-MAYOBS5 - 20-21 août 2019 ; MAYOBS13-2 4-11 mai 2020 ; MAYOBS15 - 1-26 octobre 2020 ; MAYOBS17 - 17-21 janvier 2021 ; *Rinnert et al., 2019*) ont mis en évidence de nouvelles coulées de lave, au sud, à l'ouest et au nord-ouest du nouveau site éruptif, laissant supposer la présence de plusieurs points de sortie de lave dans la région du nouveau site éruptif. Depuis le mois d'août 2019, les nouvelles coulées de lave ont uniquement été observées à environ 6 km au nord-ouest du sommet du nouveau volcan par différentiel bathymétrique. Cette zone a été échantillonnée *in situ* pour la première fois lors de la campagne MAYOBS15 (*Rinnert et al., 2020*), en octobre 2020, et les premières images de lave incandescente sur une coulée active au nord-ouest du sommet du volcan ont été prises avec le SCAMPI (caméra tractée près du fond). La signature éruptive et magmatique des signaux géochimiques au niveau des nouvelles coulées de l'édifice volcanique se manifeste par des concentrations élevées en méthane (CH₄) dissous, dioxyde de carbone (CO₂), dihydrogène (H₂), et des anomalies marquées en turbidité et Manganèse Total Dissolvable (TdMn). Lors des campagnes de surveillance MAYOBS18 (du 09 au 13 avril 2021 ; *Rinnert et al., 2021a*) et MAYOBS19 (du 27 mai au 01 juin 2021 ; *Rinnert et al., 2021b*), aucune évolution morphologique majeure n'a été mise en évidence dans la zone des coulées au nord-ouest du nouveau volcan. **Lors des trois dernières campagnes sur site, MAYOBS21 (13 septembre au 4 octobre 2021 ; *Rinnert et al., 2021c*), MAYOBS23 (9 au 22 juillet 2022 ; *Jorry et al., 2022*) et MD242-MAYOBS25 (11 au 28 septembre 2023 ; *Thinon et Lebas, 2023*), à nouveau, aucune nouvelle coulée de lave n'a été mise en évidence via le sondeur multifaisceaux coque.**

5. La structure volcanique du Fer à Cheval, située à l'aplomb de l'essai sismique proximal (le plus proche de Petite-Terre, nommé précédemment essaim principal ; 5-15 km à l'Est de Petite-Terre), est une structure préexistante à l'éruption sous-marine de Fani Maoré, dont l'âge de la mise en place reste à déterminer. Cette structure fait partie de la chaîne volcanique sous-marine orientale de Mayotte qui est constituée d'un grand nombre d'édifices volcaniques, actuellement d'âge inconnu, qui se sont formés à la suite de nombreuses éruptions qui témoignent d'une activité volcanique passée intense et de styles éruptifs diversifiés. Cette chaîne s'étend d'ouest en est sur une distance d'environ 50 km, depuis les anciens volcans de Petite-Terre jusqu'au site du nouveau volcan actif. Des panaches acoustiques associés à des anomalies géochimiques ont été détectés dans la colonne d'eau au-dessus de cette structure du Fer à Cheval. La hauteur des panaches acoustiques peut atteindre 1000 m et ils sont visibles jusqu'à 500 m de la surface de la mer. La chronologie de l'observation par acoustique des sites actifs d'émission de fluides sur la zone du Fer à Cheval suit le schéma suivant : sites A0 et B0 depuis mai 2019, site C0 depuis août 2019, sites D0 et E0 depuis mai 2020, sites C1 et F0 actifs depuis octobre 2020 en simultané à une expansion vers le nord-ouest des sites A0 et B0 (observation des nouveaux sites B1, A1 et A2), sites G0, D1, C2+C3 et C4 entre janvier et mai 2021, site H0 observé le 10 juillet 2021. Le site actif I0 a été observé le 20 septembre 2021 lors de la couverture acoustique de surveillance du Fer à Cheval pendant la campagne MAYOBS21 (*Rinnert et al., 2021c*) ainsi que les sites D2 et C5 en analyse à terre post-campagne. Le site J0, situé au sud à l'extérieur du Fer à Cheval a été identifié au cours de la campagne MD239-MAYOBS23 (*Jorry et al., 2022*) le 10 juillet 2022. L'analyse détaillée post-campagne des données acoustiques colonne d'eau acquises pendant MAYOBS23 révèle l'observation de deux nouveaux sites en plus du site J0 : I1 à environ 240 m au sud-ouest du site I0 et D3 sur le flanc intérieur est. **Enfin un nouveau site actif d'émission nommé K0 a été observé, à proximité du site H, dans le prolongement du flanc ouest du Fer à Cheval lors de la dernière campagne en mer MD242-MAYOBS25 (*Thinon et Lebas, 2023*). L'analyse préliminaire des données acquises lors de MD242-MAYOBS25 a permis de valider la pérennité de l'activité d'émission de fluides sur les sites identifiés lors des campagnes précédentes (22 sites observés en juillet 2022, MAYOBS23) et le nouveau site K0. L'activité de trois sites (F0, C4 et I0) reste à déterminer à partir d'une analyse plus approfondie : soit le signal est trop faible pour être détecté ou inexistant soit l'activité des sites adjacents s'est intensifiée rendant leur discrimination spatiale difficile. Comme par le passé, dans des conditions de courants faibles et à marée basse, certains des panaches continuent d'atteindre des hauteurs très importantes (une valeur minimale de 350 m sous la surface de l'eau, soit parfois plus de 1000 m de hauteur depuis le fond marin).**

Les panaches acoustiques et géochimiques restent donc fortement actifs dans la zone du Fer à Cheval. Les signatures géochimiques sont également très marquées mais suggèrent des sources ou des processus différents de ceux de la zone du nouveau volcan. **Les fluides émis en fond de mer et collectés lors de la campagne GEOFLAMME sont composés majoritairement de dioxyde de carbone CO₂ (99,0 ± 0,3 %_{vol}), avec une faible contribution de méthane CH₄ (0,8 ± 0,2 %_{vol}) et de dihydrogène H₂ (10 à 1000 ppm_{vol}). La signature isotopique du carbone stable (¹³C) montre que le CO₂ est d'origine mantellique et suggère que le CH₄ est quant à lui d'origine abiotique, bien qu'une contribution mixte**



biogénique/thermogénique (i.e. issue d'une transformation de matière organique) ne puisse être complètement exclue. L'hélium et sa signature isotopique ($^3\text{He}/^4\text{He}$) mesurés sur les panaches indiquent une source mantellique, confirmant l'origine magmatique profonde des fluides, obtenue avec les isotopes stables du carbone. Les signatures élémentaires et isotopiques des différents gaz constituant les fluides émis au niveau du Fer à Cheval sont similaires aux gaz émis à terre au niveau de Petite-Terre. La poursuite des analyses des panaches en mer permettra d'observer l'évolution spatiale et temporelle du processus en cours.

6. En l'état actuel des connaissances, l'éruption a produit un volume estimé d'environ $6,55 \text{ km}^3$ de lave depuis le début de son édification (sans correction de la vésicularité très variable des laves émises). Selon les différents modèles et interprétations proposées à ce jour, l'éruption aurait pu débuter le 18 juin 2018 (modèle de *Cesca et al., 2020*), voire le 3 juillet 2018 (modèle de *Lemoine et al., 2020*). Sur une période de 10 mois (de juillet 2018 - début des déformations de surface enregistrées à Mayotte – au 18 mai 2019), le flux éruptif minimum moyen de lave a été d'environ $172\text{-}181 \text{ m}^3/\text{s}$ sur une durée maximale de 320 à 336 jours. Depuis la découverte de l'édifice volcanique, quatre nouveaux points de sortie distants ont été identifiés et ont produit : 1) au sud environ $0,2 \text{ km}^3$ de lave en 30 jours (19 mai-17 juin 2019) pour un flux minimum moyen de l'ordre de $77 \text{ m}^3/\text{s}$; 2) à l'ouest environ $0,3 \text{ km}^3$ de lave en 43 jours (entre le 18 juin et le 30 juillet 2019) pour un flux minimum moyen de $81 \text{ m}^3/\text{s}$; 3) au nord-ouest environ $0,08 \text{ km}^3$ de lave en 21 jours (entre le 31 juillet et le 20 août 2019) pour un flux minimum moyen de l'ordre de $44 \text{ m}^3/\text{s}$; 4) au nord-ouest environ $0,8 \text{ km}^3$ de lave en 265 jours (entre le 21 août 2019 et le 11 mai 2020) pour un flux minimum moyen de l'ordre de $35 \text{ m}^3/\text{s}$; 5) au nord-ouest entre $0,1$ à $0,2 \text{ km}^3$ de lave en 153 jours (entre le 11 mai et le 11 octobre 2020) pour un flux minimum moyen de l'ordre de $11 \text{ m}^3/\text{s}$.

Lors des dernières campagnes, MAYOBS21 (13 septembre au 4 octobre 2021, *Rinnert et al., 2021c*) et MAYOBS23 (9 au 22 juillet 2022 ; *Jorry et al., 2022*), à nouveau, la présence de nouvelles coulées de lave n'a pas été mise en évidence. Depuis début 2021, l'éruption est probablement arrêtée mais aucune hypothèse n'est pour l'instant écartée quant à l'évolution de la situation à venir (arrêt définitif, reprise de l'activité éruptive sur le même site, reprise de l'activité éruptive sur un autre site), compte tenu de l'activité sismique persistante et d'émissions de fluides localisées sur le Fer à Cheval. Les volumes et flux éruptifs, notamment au début de la crise, ont été exceptionnels et ont été, malgré les incertitudes, parmi les plus élevés observés sur un volcan effusif depuis l'éruption du Laki (Islande) en 1783.

7. Des dégagements terrestres gazeux importants d'origine hydrothermale (majoritairement CO_2) et de faible température sont connus depuis de nombreuses années (au moins depuis 1998) sur l'estran de la plage de l'aéroport (sud Petite-Terre) et au sein du Lac Dziani. Depuis novembre 2020, une station de suivi en continu des émissions de CO_2 par le sol a été installée par l'OVPF/IPGP à proximité de la plage de l'aéroport. **Depuis l'installation de la station, une diminution progressive et ensuite une stabilisation des émissions de CO_2 par le sol (et de leur composition isotopique) est mesurée.** La composition chimique des gaz hydrothermaux riches en CO_2 (bullages) collectés dans le point de contrôle avec la série temporelle la plus longue (C1 - estran de l'aéroport) indique une tendance à la diminution progressive de l'apport des fluides profonds mantelliques depuis avril 2019. Cette diminution s'accompagne d'une baisse continue des températures d'équilibre des fluides au sein du système hydrothermal (environ 50°C). **Le suivi de la chimie du lac Dziani Dzaha depuis 2010 a permis d'identifier une diminution drastique du pH et du $d^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ après novembre 2020, en lien avec une augmentation importante des flux de CO_2 d'origine magmatique et mantellique traversant sa colonne d'eau.**

8. Les réseaux de GPS (temps réel) et des sismomètres (à terre : temps réel ; et en mer : relevés tous les 3 à 4 mois) ont été renforcés depuis début 2019.

9. Les scientifiques restent mobilisés pour analyser et interpréter la multitude de données acquises au cours des derniers mois à terre et en mer. Compte tenu de l'absence d'observation de volcanisme historique et du peu de connaissance sur le fonctionnement de la ride NO-SE, de plus de 50 km de long, qui s'étend de Mayotte à la zone volcanique sous-marine active, une incertitude significative existe quant à l'évolution de cette éruption (migration de magma, durée et évolution de l'éruption en cours, nouveaux points de sortie de lave) et de l'activité associée (sismicité, déformation, dégazage).

Suite à des carottages, des données ont été acquises proche des côtes de l'île de Mayotte lors de la campagne MAYOBS19 (du 27 mai au 01 juin 2021 ; *Rinnert et al., 2021b*). Leur analyse va fournir de nouvelles informations sur le volcanisme historique de Mayotte en reconstruisant la chronologie et la succession des événements volcaniques ayant eu lieu dans la région. Ces données permettront également de connaître la stabilité de la pente sédimentaire est de Mayotte.



10. Les résultats des analyses de l'ensemble des laves échantillonnées par dragues à roches lors des campagnes océanographiques MD220-MAYOBS1, MD221-MAYOBS2 et MD223-MAYOBS4, MAYOBS15, MD234-MAYOBS21, MD239-MAYOBS23 (Rinnert *et al.*, 2019) sur le site de l'éruption de Fani Maoré et sur d'autres sites volcaniques de la ride NO-SE qui s'étend de Mayotte à la zone volcanique sous-marine active, indiquent leur appartenance à une série magmatique d'alcalinité faible à modérée, caractéristique du volcanisme du nord de Mayotte. Elles montrent une variété compositionnelle, depuis les basanites (MAYOBS4-DR09) jusqu'aux phonolites (MAYOBS1-DR02, MAYOBS2-DR07, MAYOBS15-DR13, MAYOBS15-DR16, MAYOBS15-DR17), déjà connue dans les échantillons subaériens de Petite-Terre. Les produits échantillonnés par dragages sur le site volcanique actif correspondent majoritairement à des laves basiques ($45 < \text{SiO}_2 \text{ pds\%} < 47$), légèrement évoluées (basanites, $3,6 < \text{MgO pds\%} < 5,3$), avec des valeurs de porosité s'étalant de 14 à 50 % (Berthod *et al.*, 2021a, 2021b, 2022). Leur composition chimique (analyses en roche totale) varie peu, qu'il s'agisse des formations initialement cartographiées en mai 2019 (MAYOBS1-DR01, MAYOBS4-DR10 et DR12), ou des coulées émises entre mai et juin 2019 (MAYOBS2-DR08), entre juin et juillet 2019 (MAYOBS4-DR11), ainsi qu'entre août 2019 et octobre 2020 (MAYOBS15-DR14, DR15, DR18). Les dragages effectués dans la zone du Fer à Cheval et de la Couronne révèlent une production magmatique ancienne de composition variée, à dominante phonolitique mais avec aussi une composante basanitique, et un style éruptif à dominante explosive ayant produit la construction des nombreux cônes volcaniques sous-marins. **Les analyses en géochimie de roche totale des coulées de lave draguées à proximité du Fer à Cheval (DR36, DR37, DR38) lors de la campagne MD242-MAYOBS25 montrent des compositions de phonolites peu évoluées typiques de la majorité des phonolites échantillonnées dans la zone du Fer à Cheval.**

11. La province volcanique sous-marine proche de l'île de Mayotte représente un enjeu majeur dans la compréhension de l'aléa lié à la crise éruptive actuelle. L'analyse d'un échantillon de lave phonolitique très peu ou pas altérée et d'apparence très récente, qui provient de la drague MAYOBS2-DR07 prélevée dans la zone de l'essai sismique proximal actif, à environ 15 km au sud-est de Petite-Terre (voir pour plus de détails le bulletin REVOSIMA N° 4) révèle les rapports de (dés)équilibres radioactifs suivants : équilibre ^{210}Po - ^{210}Pb avec un rapport (Po/Pb) de $0,99 \pm 0,03$, indifférenciable de 1 et un équilibre ^{210}Pb et ^{226}Ra avec là aussi, un rapport (Pb/Ra) de $0,99 \pm 0,03$, indifférenciable de la valeur d'équilibre, selon les dernières analyses (octobre 2020). Si (au conditionnel) ces trois isotopes ^{210}Po , ^{210}Pb , ^{226}Ra ont été fractionnés au cours de l'évolution superficielle du magma (cristallisation et dégazage), alors ce fractionnement est plus vieux que 2,3 ans (d'après la période de 138 jours de ^{210}Po) et même plus vieux que 132 ans (d'après la période de 22 ans de ^{210}Pb). Des datations par la mesure du ^{230}Th sont donc nécessaires afin de tester s'il existe un déséquilibre ^{226}Ra - ^{230}Th , ce qui permettrait - en cas de déséquilibre - de confirmer qu'il s'agit bien d'un magma récent de moins de quelques milliers d'années. Pour l'instant, l'âge de cette coulée reste inconnu. Une nouvelle datation sera aussi effectuée sur une ancienne coulée similaire et juxtaposant la coulée MAYOBS2-DR07 et qui a été échantillonnée lors de la campagne MAYOBS15 (DR13). Des datations sont en cours sur les produits explosifs anciens de la zone du Fer à Cheval échantillonnés dans les dragues MAYOBS15-DR16 et MAYOBS15-DR17, et celles des campagnes MAYOBS21 et MAYOBS23. Malgré les nombreuses questions scientifiques en suspens et des incertitudes intrinsèques à la compréhension des systèmes géologiques complexes, ces nouvelles données viendront combler petit à petit les lacunes de connaissances sur la nature, l'ampleur, la dynamique et la chronologie de l'activité de la province volcanique de Mayotte dont une très large partie a été mise en place en milieu sous-marin difficilement accessible.

12. L'analyse de toutes les données acquises depuis le début de l'activité sismo-volcanique en mai 2018 et en cours d'acquisition nécessite des travaux approfondis pour améliorer l'évaluation des aléas et des risques induits (sismique, volcanique, tsunami) pour Mayotte. Le programme d'étude est actualisé et renforcé au vu des nouveaux éléments de connaissances apportés par ces analyses.



Sismicité régionale

Mayotte et l'archipel volcanique des Comores se situent dans une zone de sismicité modérée dans une région entre l'Est de l'Afrique et Madagascar marquée par la présence de différentes plaques tectoniques, dont les plaques Somalie et Lwandle. La caractérisation de la frontière entre ces deux plaques est encore l'objet de travaux, mais il a été proposé que l'archipel des Comores, où le volcanisme récent et la sismicité sont distribués (Bertil *et al.*, 2021 ; Thinon *et al.*, 2022), délimite une frontière de plaque immature entre les plaques Somalie et Lwandle (Famin *et al.*, 2020). L'activité sismique de l'archipel reste encore peu connue car faiblement détectée par les réseaux sismiques existants. Des séismes régionaux peuvent être fortement ressentis à Mayotte (séismes de 2011, 2020 de magnitude 5.0) ou provoquer des dommages légers au bâti (séisme de 1993 et séisme historique de 1936 avec des intensités VI)

Le suivi mis en place par le REVOSIMA pour surveiller la zone d'essaims sismiques liés à l'activité sismo-volcanique autour de Fani Maoré, appuyé par les stations sismiques disponibles dans la région, permet également de détecter des séismes hors de cette zone d'activité, qu'ils soient locaux ou régionaux (jusqu'à des magnitudes 2.5 pour les séismes les plus proches) et donc d'améliorer la connaissance de l'activité sismique autour de Mayotte.

Au cours du mois de novembre 2023, 34 séismes régionaux ont pu être localisés (Figure 1). Le plus fort, le 16 novembre, dans le canal du Mozambique au niveau de la Ride de Davie, à 446 km de Mayotte, avait une magnitude MI=3.6.

5 séismes sont détectés à moins de 150 km de Mamoudzou. Aucun n'est susceptible d'avoir été ressenti par la population mahoraise. **Le plus fort, le 11 novembre, de magnitude MI=3.1 à 92 km de Mamoudzou se situe au sud d'Anjouan.** Le plus proche, de magnitude MI=2.8 a lieu au sud du Banc de Zélée à 87 km de Mamoudzou.

A noter, un petit essaim sismique dans la région de Nosy Be, au Nord-Ouest de Madagascar à 340 km de Mayotte. Une trentaine de séismes sont détectés principalement entre le 12 et le 15 Novembre. La magnitude maximale est MI=3.2. Pour une dizaine de ces séismes on a une localisation approximative. Cette région possède des édifices volcaniques récents (Pliocène-Holocène).

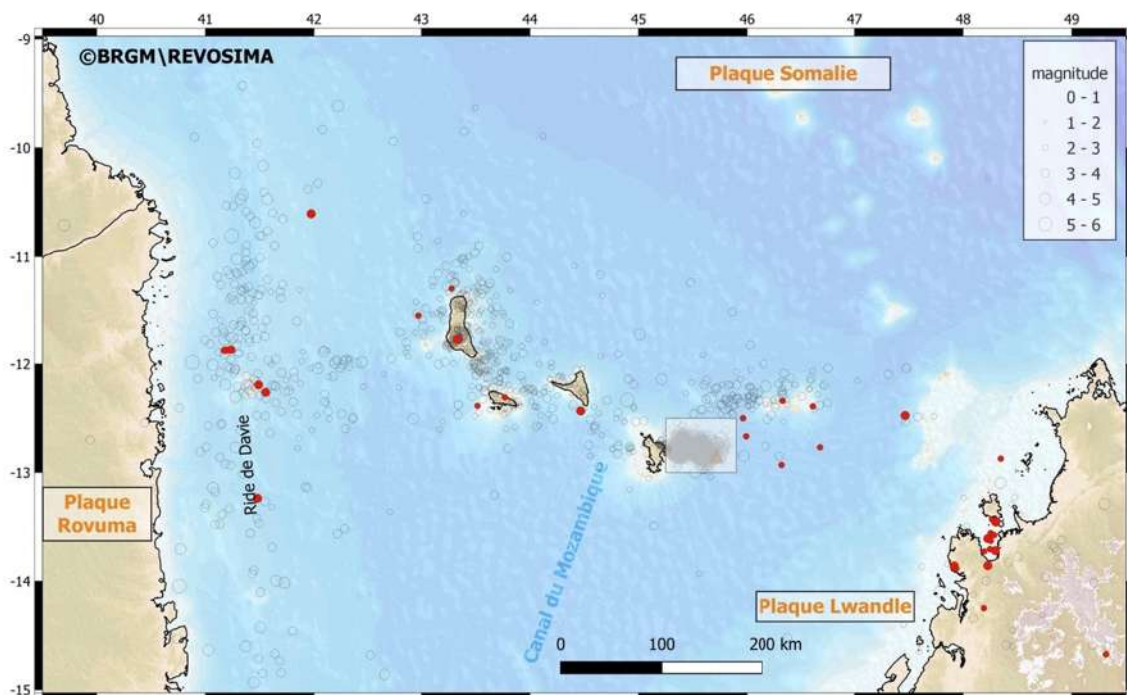


Figure 1: Sismicité régionale enregistrée depuis 2018 (modifié d'après Bertil *et al.*, 2021). Les séismes de novembre 2023 sont représentés en rouge. Le fond de carte est construit à partir des données topographiques et bathymétriques de Gebco 2022 (www.gebco.net). Le trait de côte et les frontières administratives sont extraits de <https://gadm.org/>. Le carré blanc encadre les essaims sismiques surveillés depuis 2018. Se référer aux Figures 2 et 3 de ce bulletin pour la distribution de cette sismicité.



Sismicité locale

Depuis le 16 mai 2018, un point de situation sur l'activité sismique était publié par le BRGM (<https://www.brgm.fr/content/essaim-seismes-mayotte-points-situation>) dans le cadre du suivi de l'essai sismique de Mayotte qu'il a assuré depuis cette date et jusqu'à la création du Réseau de surveillance Volcanologique et Sismologique de Mayotte (REVOSIMA). Le REVOSIMA a publié un bulletin bi-mensuel de l'activité entre août 2019 et février 2020. Dans le cadre du renforcement du suivi de l'activité sismo-volcanique et afin de proposer une information plus fréquente, le REVOSIMA publie depuis le 17 mars 2020, un bulletin automatique préliminaire de l'activité enregistrée la veille, sur un format court, issu de l'examen d'une analyste du REVOSIMA : http://volcano.ipgp.fr/mayotte/Bulletin_quotidien/bulletin.html. Ce bulletin quotidien est complété par un bulletin détaillé qui passe désormais à une fréquence mensuelle à partir de mars 2020.

L'analyse de la sismicité se base sur les données issues d'un réseau de stations à terre réparties dans la région de Mayotte dont les données sont analysées tous les jours et d'un parc de capteurs en mer (OBS : Ocean Bottom Seismometer) qui sont relevés après plusieurs semaines d'installation et dont les données sont accessibles en différé. Les données des stations à terre et des OBS sont fournies par l'ensemble des partenaires impliqués dans le suivi de la crise. Pour plus de précisions sur l'analyse de la sismicité, voir le bulletin n° 1 (<https://www.ipgp.fr/fr/revosima/actualites-reseau>)

Avec le recrutement de nouveaux personnels en 2020 dans le cadre de la pérennisation du REVOSIMA, des ressources humaines supplémentaires sont désormais dédiées au dépouillement sismique, ce qui a permis d'abaisser la magnitude minimale des séismes identifiés (magnitude de complétude). Il est désormais possible de mieux identifier les séismes de plus petites magnitudes < M1,5.

Jusqu'au 28 février 2021, le RENASS (Réseau national de surveillance sismologique) et le REVOSIMA utilisaient deux méthodes complémentaires et différentes pour détecter la sismicité observée à Mayotte. Le RENASS se basait sur des algorithmes de détection en temps réel, qui permettent une localisation automatique et rapide des événements, mais qui nécessitent que les données arrivent en temps réel et que la magnitude des événements soit suffisamment élevée pour avoir du signal sur toutes les stations de mesure. Les événements détectés automatiquement étaient ensuite validés par les analystes du RENASS. Le REVOSIMA complétait ces détections par un examen manuel minutieux quotidien de l'ensemble des données. Cela permettait de détecter des événements de plus petite magnitude seulement visibles sur les stations les plus proches des événements et qui ne sont pas détectés automatiquement, mais aussi de travailler sur des données arrivées en temps différé. En contrepartie, toute cette information n'était rapportée que le lendemain dans le bulletin quotidien, après l'examen complet des données de la veille. En cas de séisme ressenti par la population, les données étaient analysées dès que possible par le REVOSIMA. L'ensemble des détections du RENASS était comptabilisé dans les détections du REVOSIMA qui établit et maintient un catalogue le plus complet possible. Ce catalogue est affiné et complété par les résultats des analyses des données des OBS (sismomètres de fond de mer) qui sont relevés lors des campagnes MAYOBS (*Rinnert et al., 2029 ; Saurel et al., 2022*). Les localisations de la sismicité volcanique et tectonique enregistrées par le REVOSIMA en temps réel sont disponibles sur : <https://renass.unistra.fr/fr/zones/mayotte/> et sur le bulletin quotidien du REVOSIMA.

Depuis le 1^{er} mars 2021, un nouvel algorithme de détection et de localisation en temps-réel de la sismicité est en place au REVOSIMA et remplace les algorithmes précédemment utilisés par le RENASS (*Retailleau et al., 2022a ; 2022b*). Les localisations affichées par le RENASS sont donc désormais uniquement issues du REVOSIMA. Ce nouvel algorithme permet une localisation automatique plus fiable avant leur validation par les analystes. Il est également plus sensible et permet donc de localiser une plus grande proportion de la sismicité comptabilisée par le REVOSIMA. Les cartes de localisation affichent donc dorénavant plus d'événements. Enfin, ce nouvel algorithme permet également la localisation d'une partie de la sismicité LP (basse fréquence), qui n'avait pas été localisée jusqu'alors. Tous les événements détectés automatiquement restent validés par les analystes du REVOSIMA.

Ce nouvel algorithme se base sur une méthode d'intelligence artificielle à base de réseau de neurones reconnaissant les deux principales ondes d'un séisme (onde P et onde S). De plus, cet algorithme est associé à un nouveau modèle de vitesse élaboré à partir de la sismicité enregistrée par les stations à terre et les OBS depuis mars 2019 (*Lavayssière et al., 2022*). Ces améliorations sont le résultat des travaux effectués en 2020 par deux chercheuses en contrats post-doctoraux financés par le REVOSIMA.



Entre le 1^{er} et le 30 novembre 2023, le Réseau de surveillance Volcanologique et Sismologique de Mayotte (REVOSIMA) a détecté, avec le réseau de stations terrestres, un total de 776 séismes Volcano-Tectoniques (VT ; séismes dont la gamme de fréquence est la plus large, de 2Hz à 40Hz), 13 séismes Longue Période (LP ; basse fréquence, entre 0,5 et 5 Hz) et aucun séisme Très Longue Période (VLP ; très basse fréquence, entre 5 et 100 secondes) localisés entre Mayotte et le nouveau site éruptif à 50 km au sud-est de Mayotte (Figures 2, 3, 4, 5, 6 et 7, et Tableaux 1 et 2). A noter que l'installation d'une nouvelle station sur l'îlot de Mbouzi et un dépouillement plus fin de ses données à partir de mars 2023 a entraîné une augmentation du nombre de séismes détectés. Cette augmentation n'est donc pas liée à une évolution de l'activité mais à la détection d'événements de plus faible magnitude qui n'étaient pas identifiés auparavant.

Après une lente décroissance d'avril 2020 à début 2022, la sismicité s'est stabilisée avec des fluctuations dans la détection manuelle des séismes de faible magnitude dépendantes entre autres de la sensibilité propre à chaque opérateur et de la variabilité du bruit sur les stations, notamment pendant la journée. Les derniers séismes de plus forte magnitude (énergie), dont le dernier ressenti s'est produit le 31 août 2023 (ML 4.1), ont eu lieu majoritairement dans l'essai distal ou entre les deux essais (l'essai distal est le plus éloigné de Petite-Terre et s'étend le long de l'alignement de cônes volcaniques jusqu'au site de Fani Maoré ; Figure 2). La sismicité basse fréquence (séismes longue-période et très longue-période) est toujours présente dans l'essai proximal et est relativement stable.

- **Sur le dernier mois, 13 séismes LP a été enregistré.** La majorité des séismes LP ont lieu lors d'essais de quelques dizaines de minutes, parfois de manière répétée dans une journée ou sur quelques jours, et sont souvent associés à des signaux VLP (*Retailleau et al., 2022b*). **Pour le mois de novembre 2023, aucun VLP n'a été enregistré.** Les séismes LP et VLP sont des signaux sismiques habituellement associés dans la littérature à des résonances et des mouvements de fluides (magmatique ou hydrothermal). Les signaux LP sont localisés à une dizaine de kilomètres à l'est de Petite-Terre dans la zone de l'essai sismique le plus actif entre 25 et 40 km de profondeur, au même endroit que ceux localisés depuis février 2020. Des travaux sont en cours pour mieux comprendre ces signaux. La profondeur des VLP enregistrés entre février et avril 2019 a été estimée entre 30 et 40 km (*Feuillet et al., 2021*). Cependant, ils restent difficiles à localiser et analyser et font l'objet d'une étude spécifique en cours (*Thèse de doctorat d'A. Laurent, IPGP*).

Au total, 66 séismes ont pu être localisés manuellement (62 VT et 4 LP ; Figure 2), dont 18 VT de magnitude M2 à M3 et 1 VT de magnitude M3 à M4. Ce nombre reste relativement stable sur les derniers mois. Ces séismes sont majoritairement localisés entre 0 et 30 km à l'est de Petite-Terre (Figures 2, 3, 4, 5, 6 et 7, Tableaux 1 et 2). Ce nombre de séismes localisables est relativement stable depuis fin 2022.

Période du : 1 ^{er} au 30 novembre 2023	
Sismicité volcano-tectonique (VT) enregistrée par le réseau terrestre et validée et localisée, excluant les détections automatiques non validées	
(entre parenthèse les chiffres pour la période du 1 ^{er} au 31 octobre 2023 détectés selon le même protocole)	
Classe de magnitude	Nombre de Séismes
M < 1	14 (13)
M1 à M2	29 (38)
M2 à M3	18 (21)
M3 à M4	1 (3)
M4 à M5	0 (0)
M5 à M6	0 (0)
M1-M6	48 (62)
M >= 2	19 (24)

Tableau 1 : Répartition des séismes volcano-tectoniques (VT) et tectoniques (hors essais) enregistrés, validés et localisés par le réseau terrestre par classe de magnitude du 1^{er} au 30 novembre 2023.



Total séismes ≥ 3.5	Dont M ≥ 4.0	Dont M ≥ 4.5	Dont M ≥ 5.0	Dont M ≥ 5.5
2062	569	153	36	2

Tableau 2 : Comptage des séismes volcano-tectoniques (VT) et tectoniques (hors essais) localisés de magnitude $M > 3,5$ du 10 mai 2018 au 30 novembre 2023 par classe de magnitude (base de données BRGM et REVOSIMA).

- **Ramené à des valeurs moyennes quotidiennes on note, entre le 1^{er} et le 30 novembre 2023, une moyenne de 2 séismes localisables par jour.**
- De manière générale, malgré une contrainte sur les profondeurs et localisations qui sont moins bonnes à partir des seules données à terre, **les hypocentres des séismes volcano-tectoniques se situent entre 20 et 50 km de profondeur.** Cela est confirmé après les relevés réguliers des OBS.
- **Si l'activité sismique est plus faible que celle enregistrée au début de la crise, elle reste néanmoins importante.** A noter que pour de nombreuses éruptions une diminution de l'énergie sismique dissipée est observée malgré la poursuite de la propagation du magma à faible profondeur et son émission en surface. Ceci témoigne d'un milieu déjà fragilisé et fracturé moins sismogène. L'activité sismique fluctue pendant une éruption et une recrudescence de l'activité sismique est toujours possible. Ainsi des magnitudes proches de 5, voire plus, sont toujours possibles comme le montre le dernier en date, celui du 10 novembre 2020 (M 5.3).
- A noter que plusieurs séismes « proches » de très faible à faible magnitude (M1-M2,5) sont toujours enregistrés entre l'essai sismique proximal et Petite-Terre, voire même sous Petite-Terre. Le traitement des données OBS qui sont relevés lors des campagnes OBS (*Rinnert et al., 2019*) montre que ces séismes de faible magnitude sont présents depuis le début des enregistrements OBS.

Comme rappelé en fin de bulletin, il est fondamental de reporter tout séisme ressenti au BCSF-RENASS sur le site : <http://www.franceseisme.fr/>



Localisation

Il n'y a pas eu d'évolution spatiale notable de la localisation de la sismicité entre le 1^{er} et le 30 novembre 2023 par rapport au bulletin précédent (voir Figures 2, 3, 4).

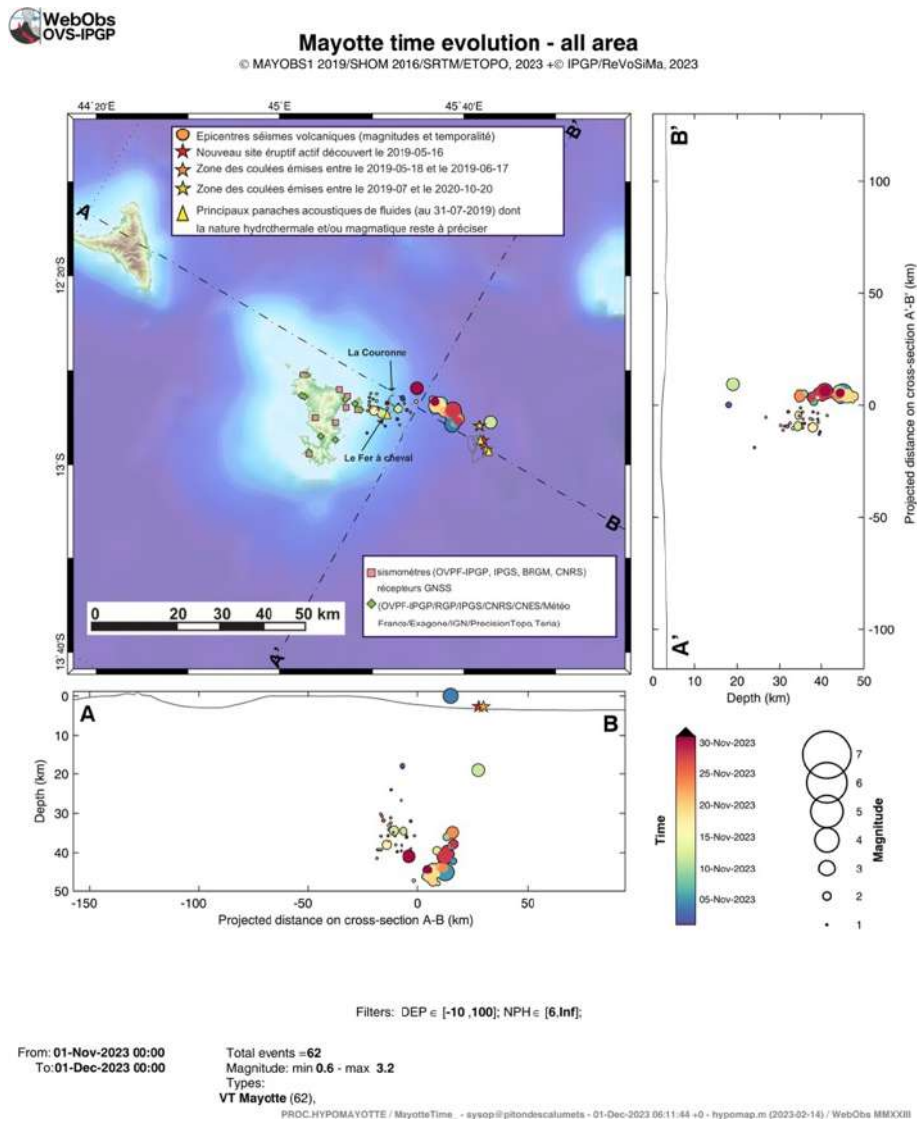


Figure 2 : Carte des épicentres (± 5 km) des séismes volcano-tectoniques (VT) localisés avec les réseaux sismiques à terre (IPGP-CNRS-BRGM-BCSF-RENASS, ITES) entre le 1^{er} et 30 novembre 2023 (échelle temporelle de couleur). Sont aussi représentées une projection des hypocentres des séismes le long 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, MAYOBS17 ; Rinnert et al., 2019) et dont la nature hydrothermale et/ou magmatique reste à préciser, est indiquée par des triangles jaunes, l'étoile rouge indique le site éruptif nouvellement identifié le 16 mai 2019, l'étoile orange la zone des coulées émises entre le 18/05/2019 et le 17/06/2019 et l'étoile jaune la zone des coulées émises entre juillet 2019 et le 18/01/2021. Les structures volcaniques de la zone dite de « La Couronne », du « Fer à Cheval » sont indiquées en grisé tout comme les coulées de lave de Fani Maoré. Les stations sismiques du réseau terrestre et les stations de positionnement par satellite GPS sont indiquées par des symboles (voir légende). (©OVPF-IPGP, BRGM, IFREMER, CNRS, BCSF-RENASS, ITES / REVOSIMA).



Mayotte time evolution - all area

© MAYOBS1 2019/SHOM 2016/SRTM/ETOPO, 2023 + © IPGP/ReVoSiMa, 2023

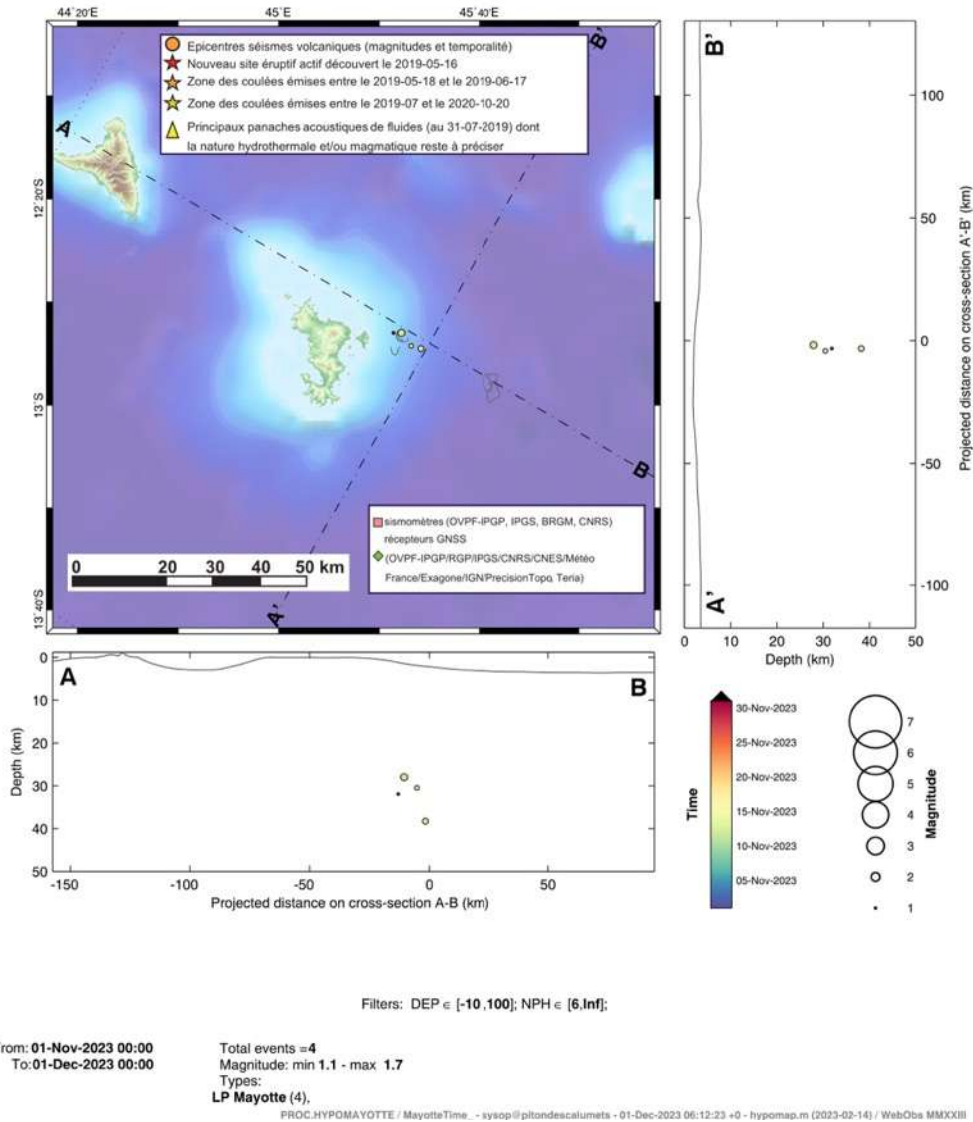
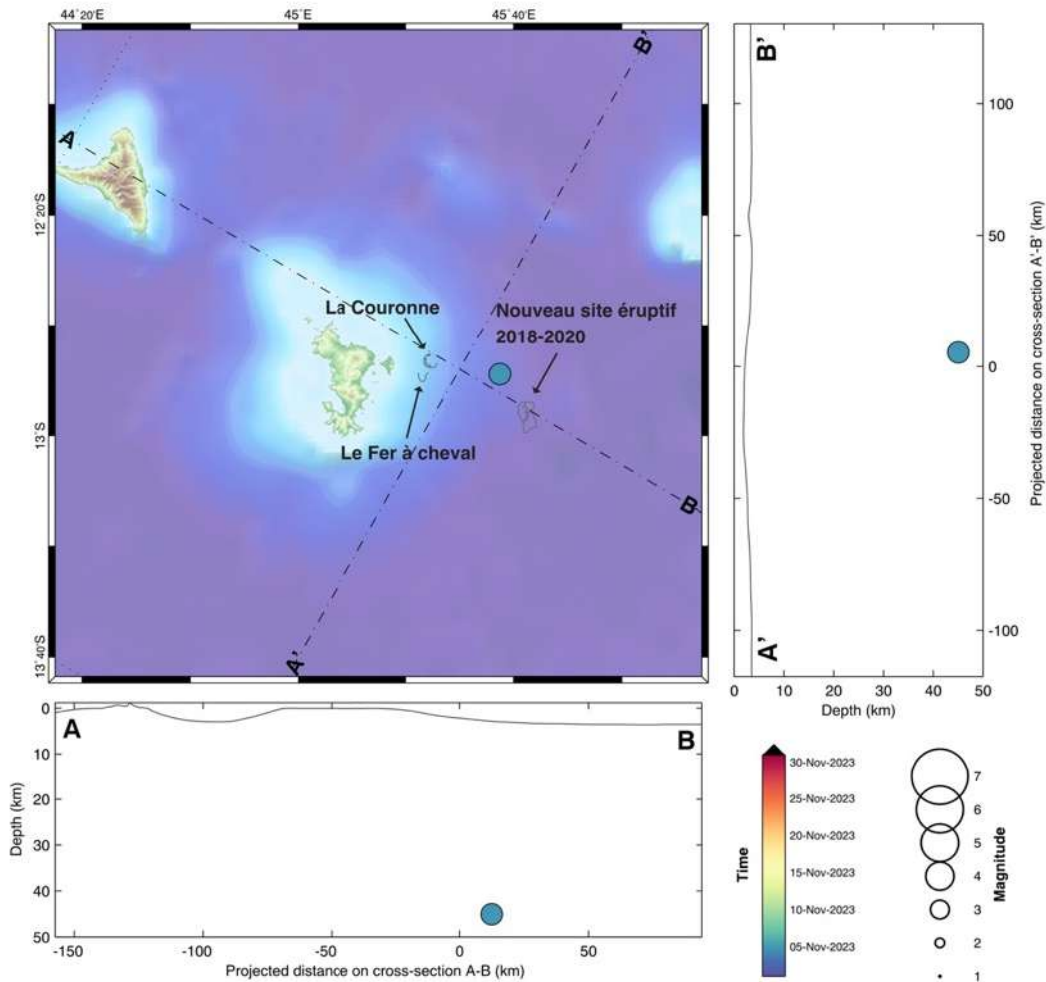


Figure 3 : Carte des épicentres (± 5 km) des séismes longue période (LP) localisés avec les réseaux sismiques à terre (IPGP -CNRS-BRGM-BCSF-RENASS, ITES) entre le 1^{er} et 30 novembre 2023 (échelle temporelle de couleur). Sont aussi représentées une projection des hypocentres des séismes le long de coupes transversales et axiales le long de la ride montrant la localisation estimée en profondeur (la précision varie entre ± 5 km et ± 15 km) des séismes en fonction de la magnitude (taille des symboles) et de la date (échelle temporelle de couleur). La localisation approximative des panaches acoustiques identifiés pendant les campagnes océanographiques (MD220-MAYOBS1, MD221-MAYOBS2, MD222-MAYOBS3, MD223-MAYOBS4, MAYOBS15, MAYOBS17 ; Rinnert et al., 2019) et dont la nature hydrothermale et/ou magmatique reste à préciser, est indiquée par des triangles jaunes, l'étoile rouge indique le site éruptif nouvellement identifié le 16 mai 2019, l'étoile orange la zone des coulées émises entre le 18/05/2019 et le 17/06/2019 et l'étoile jaune la zone des coulées émises entre juillet 2019 et le 18/01/2021. Les structures volcaniques de la zone dite de « La Couronne », du « Fer à Cheval » sont indiquées en grisé tout comme les coulées de lave de Fani Maoré. Les stations sismiques du réseau terrestre) et les stations de positionnement par satellite GPS sont indiquées par des symboles (voir légende). (©OVPF-IPGP, BRGM, IFREMER, CNRS, BCSF-RENASS, ITES / REVOSIMA).



Mayotte time evolution - all area

© MAYOBS1 2019/SHOM 2016/SRTM/ETOPO, 2023 +© IPGP/ReVoSiMa, 2023



Filters: MAG ∈ [3,6]; DEP ∈ [-10,100]; NPH ∈ [6,Inf];

From: 01-Nov-2023 00:00
To: 01-Dec-2023 00:00

Total events = 1
Magnitude: min 3.2 - max 3.2
Types:
VT Mayotte (1),

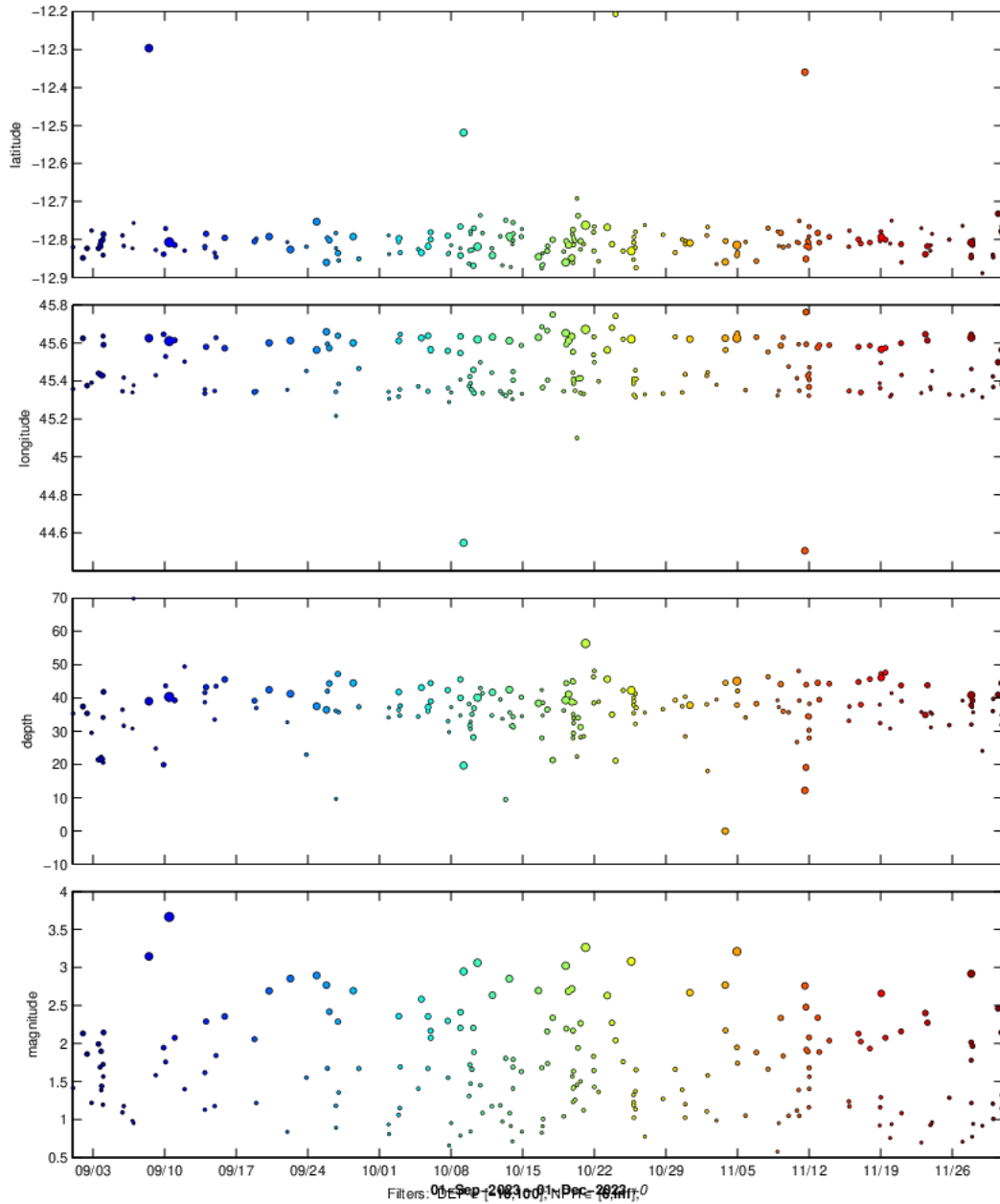
PROC.HYPOMAYOTTE / MayotteTime - sysop@pilotdescalumets - 01-Dec-2023 06:15:49 +0 - hypomap.m (2023-02-14) / WebObs MMXXIII

Figure 4 : Carte de localisation des épicentres (± 5 km) des séismes de magnitude $M \geq 3$ entre le 1^{er} et le 30 novembre 2023 enregistrés avec les réseaux sismiques à terre (IPGP-IFREMER-CNRS-BRGM-BCSF-RENASS, ITES). 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). Les structures volcaniques de la zone dite de « La Couronne », du « Fer à Cheval » sont indiquées en grisé tout comme les coulées de lave de Fani Maoré. De nombreux points de sortie de panaches de fluides dans la colonne d'eau ont été identifiés dans la structure du Fer à Cheval avec une signature géochimique magmatique (voir section Géochimie des fluides). © OVPF-IPGP, BRGM, IFREMER, CNRS, BCSF-RENASS, ITES / REVOSIMA).



Mayotte time evolution – all area

© MAYOBS1 2019/SHOM 2016/SRTM/ETOPO, 2023 +© IPGP/ReVoSiMa, 2023



From: 01-Sep-2023 00:00
To: 01-Dec-2023 00:00

Total events = 208
Magnitude: min 0.6 – max 3.7

Types:
Anthropique (1),
Inconnu (2),
LP Mayotte (20),
Regional (4),
VT Mayotte (181)

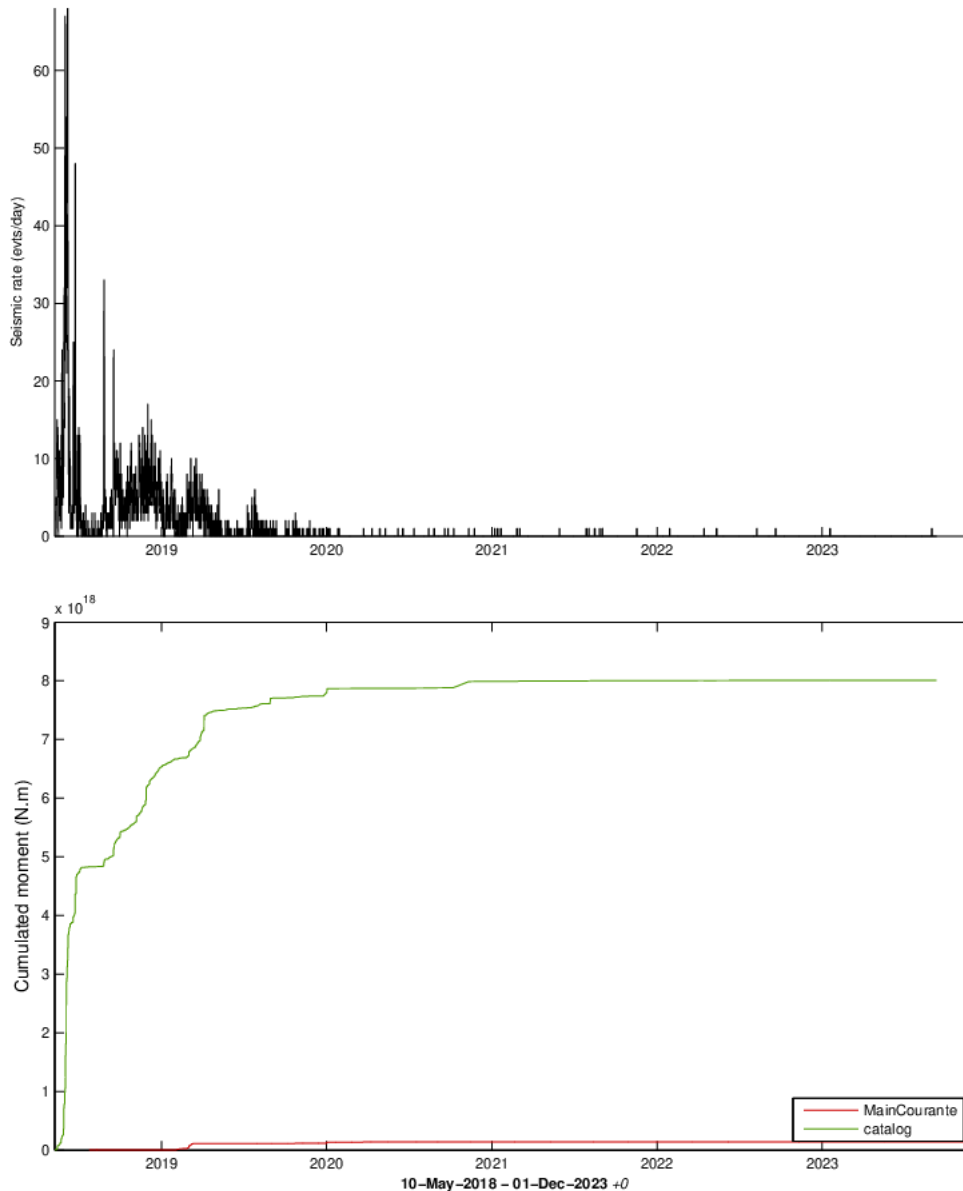
PROC.HYPOMAYOTTE / MayotteTime_time_ - sysop@pi.tondescalumets - 01-Dec-2023 07:09:26 +0 - hypomap.m (2023-02-14) / WebObs MXXXIII

Figure 5 : Variation temporelle (échelle de couleur) des principaux paramètres (latitude, longitude, profondeur et magnitude) de la sismicité enregistrée et localisée par le REVOSIMA avec les réseaux sismiques à terre (IPGP-CNRS-BRGM-BCSF-RENASS, ITES) entre le 1^{er} septembre 2023 et le 30 novembre 2023 (3 mois). Se référer à la Figure 2 pour l'échelle des magnitudes (taille des symboles). (© OVPF-IPGP, BRGM, IFREMER, CNRS, BCSF-RENASS, ITES / REVOSIMA).



Stats sismicité – M>3.5 REVOSIMA – Seismic rate and swarms

© IPGP, 2023 + © ReVoSiMa, 2023



Instantaneous seismic rate (144.0/day samples) calculated on a moving, 24h fixed-size, time window
Last event: 01-Dec-2023 00:47:45 +0

PROC.MCSTATSMAYOTTE_BIGMAG / mc3mayotte - sysop@pitondescalumets - 01-Dec-2023 07:59:26 +0 - mc3stats.m (2021-01-01) / WebObs MMXXIII

Figure 6 : En haut : Évolution temporelle du taux instantané de la sismicité volcano-tectonique (VT ; $M > 3.5$) calculé sur une fenêtre de 24h glissante toutes les 10 minutes depuis le 10 mai 2018. En bas : Évolution temporelle du moment sismique cumulé, en N.m (représentant le cumul de l'énergie dissipée par l'ensemble des séismes) sur la même période. Sur la courbe verte, le moment sismique est calculé suivant la formule de Hanks et Kanamori (1978) à partir de la magnitude locale calculée pour les séismes localisés par le RENASS. Sur la courbe rouge, le moment sismique est calculé suivant la formule de Dorel et Feuillard (1980) à partir de la magnitude de durée estimée à partir des saisies des opérateurs de l'astreinte REVOSIMA (© OVPF-IPGP et REVOSIMA).

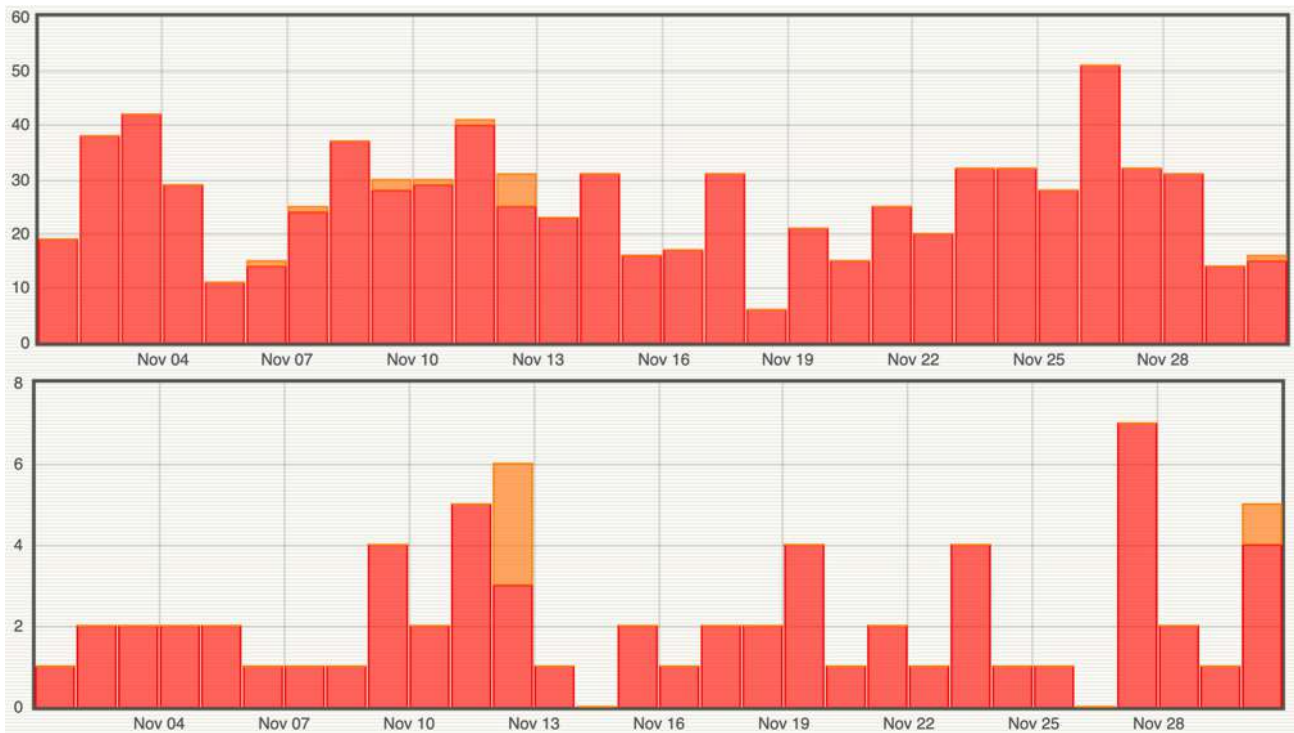


Figure 7 : Histogramme représentant le nombre de séismes par jour détectés (en haut) et localisés (en bas) en novembre 2023 par le réseau sismologique du REVOSIMA. En rouge les séismes volcano-tectoniques, en orange les séismes longues périodes, en jaune les séismes très longues périodes (© OVPF-IPGP et REVOSIMA).



Déformation à terre

Sont considérées dans ce bulletin :

- les données des stations GPS du Centre National d'Etudes Spatiales (station MAYG), EXAGONE via le réseau TERIA (stations BDRL et GAMO) et de Precision Topo via le réseau Lel@ (stations KAWE, PORO et MTSA) installées sur l'île de Mayotte, et distribuées par le RGP de l'Institut National de l'Information Géographique et Forestière (IGN),
- les stations installées à Mayotte et à Grande Glorieuse dans le cadre du réseau de surveillance financé par l'Etat,
- les stations DSUA et NOSY (Madagascar) installées par le LACy (Université de La Réunion) dans le cadre du projet INTERREG-5 Océan Indien 2014-2020 « ReNovRisk Cyclones et Changement Climatique », financé par l'Europe, la Région Réunion et l'Etat.

Les mesures de déformation indiquent entre juillet 2018 et fin 2020 (Lemoine et al., 2020 ; Feuillet et al., 2021 ; Peltier et al., 2022) un déplacement d'ensemble de l'île vers l'est et un affaissement (Figures 8 et 9). En cumulé entre le 1^{er} juillet 2018 et fin 2020 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 9). A noter que vers avril-mai 2019, un premier ralentissement des déplacements a été observé. Début 2020 les déplacements ont de nouveau ralenti et depuis mars 2020 la subsidence est devenue négligeable sur certaines stations GPS (tels que MTSA, MTSB, PORO, Figures 9 et 10). Enfin depuis fin 2020 il n'y a plus de cohérence dans les signaux de déformation qui sont devenues trop faibles et ne sortent pas du bruit, il n'y a plus de signaux interprétables.

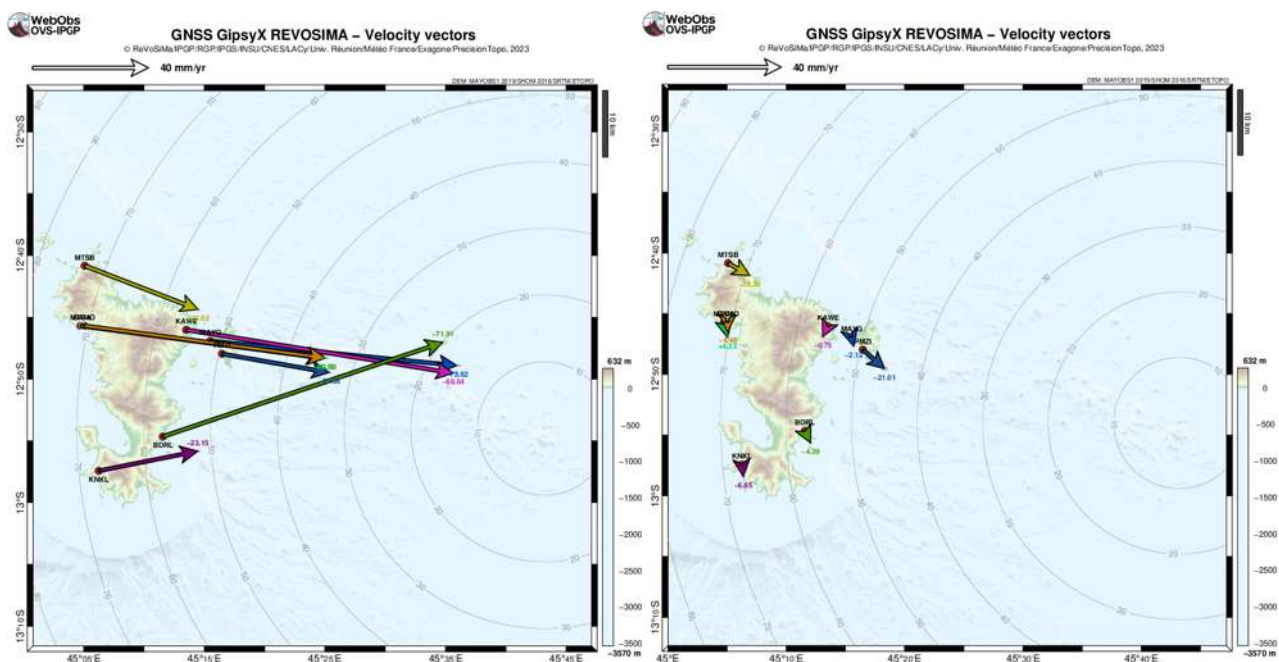


Figure 8 : Déplacements du sol enregistrés sur les stations GPS de Mayotte entre le 1^{er} juillet 2018 et fin 2020 (à gauche) et sur les derniers douze mois (à droite). Les déplacements horizontaux sont représentés sous forme vectorielle et les déplacements verticaux sont indiqués par les valeurs chiffrées en couleur. Post-traitement de ces données réalisé par l'IPGP (©OVPF-IPGP / REVOSIMA).

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



Des calculs automatiques et journaliers ont été mis en place à l'IPGP (via les logiciels GipsyX et Webobs ; *Beauducel et al., 2010 ; 2020*) afin de suivre ces déplacements, et modéliser une source de déformation en temps-réel (*Beauducel et al., 2014 ; 2020 ; Peltier et al., 2022*). Les caractéristiques d'une source unique (localisation, profondeur et variation de volume), ajustant au mieux les observations sur une période de temps considérée, sont modélisées par un point source de pression isotrope en profondeur, dans un milieu homogène et élastique. Ces modèles simples restent les plus adaptés actuellement, compte-tenu des limitations engendrées par la géométrie actuelle du réseau de mesures géodésiques (*bulletins mensuels REVOSIMA 2019 et 2020*). Mais le faible taux de déformation actuel ne permet plus de modéliser de manière suffisamment fiable une source de déflation associée à un débit.

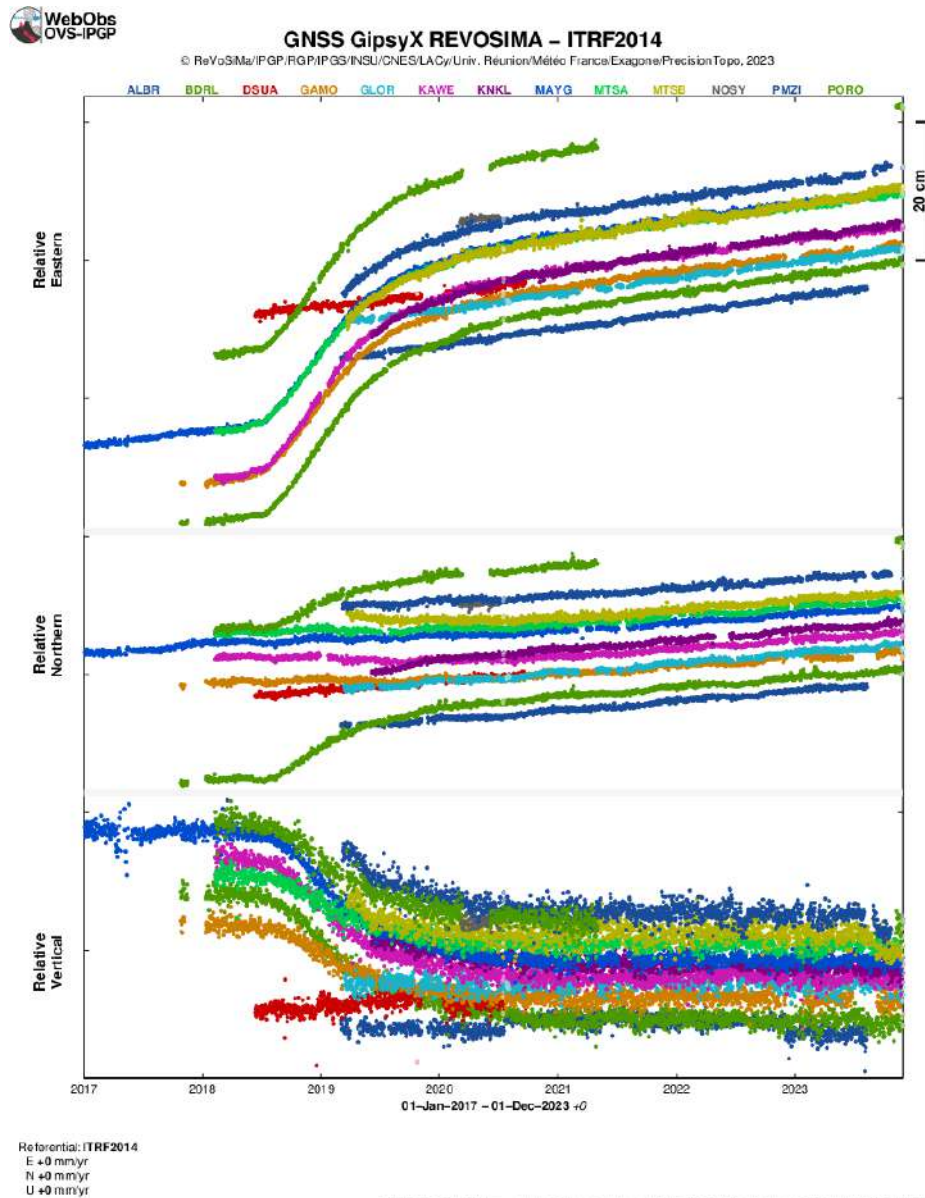


Figure 9 : Déplacements (en cm) enregistrés sur 9 stations GPS localisés à Mayotte (BDRL, GAMO, KAWE, KNKL, MAYG, MTSB, MTSB, PMZI, PORO), 1 station à Grande Glorieuse (GLOR), 1 station à Aldabra (ALBR) et 2 stations au nord de Madagascar à Diego Suarez (DSUA) et Nosy Be (NOSY) sur les composantes est (en haut), nord (au milieu) et vertical (en bas) entre le 1^{er} janvier 2017 et le 30 novembre 2023 pour visualiser une longue série temporelle ante crise. Post-traitement de ces données réalisé par l'IPGP (©OVPF-IPGP / REVOSIMA).

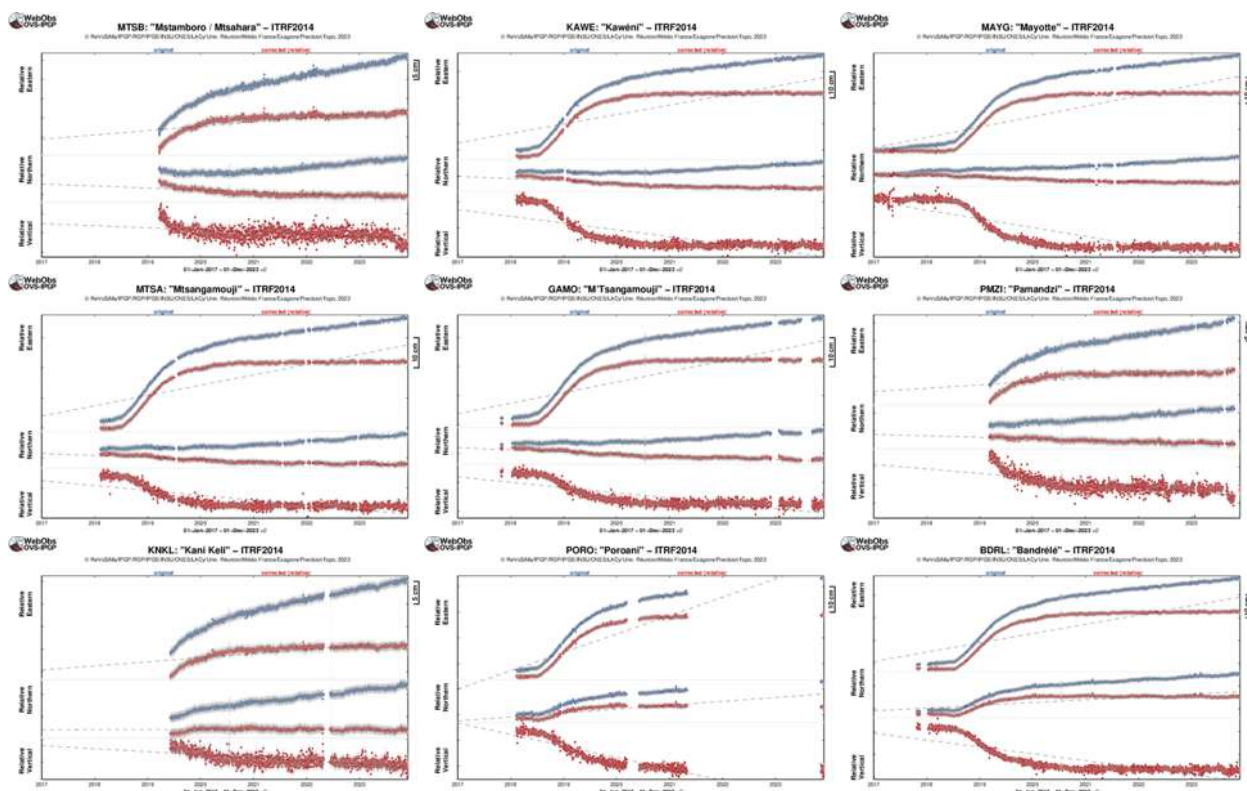


Figure 10 : Déplacements (en cm) enregistrés sur les 9 stations GPS localisés à Mayotte (MTSB, KAWE, MAYG, MTSA, GAMO, PMZI, KNKL, PORO, BDRL ; la station PORO a été remise en service le 10 novembre 2023) entre le 1^{er} janvier 2017 et le 30 novembre 2023 pour visualiser une longue série temporelle ante crise. En bleu les données brutes, en rouge les données corrigées du mouvement de la plaque. Les stations sont présentées dans un ordre géographique ; du nord au sud (de haut en bas) et d'ouest en est (de gauche à droite). Post-traitement de ces données réalisé par l'IPGP (©OVVPF-IPGP / REVOSIMA).

Déformation en mer

Aux données à terre, se rajoutent les données des capteurs de pression A-0-A qui sont installées sur le fond océanique sur le site de la Couronne et sur le site de référence localisé au nord des sites actifs (nord-est de Petite-Terre sur la pente de Mayotte).

L'analyse préliminaire des différences de pression mesurées par les deux capteurs de pression A-0-A lors de la mission MD242-MAYOBS25 (11 au 28 septembre 2023) suggère :

- 1) qu'il n'y a pas eu de déformation lente significative entre les deux sites distants d'environ 9,5 km (résidu < ~0.5 cm/an),
- 2) et qu'il n'y a pas eu de déformation transitoire pouvant correspondre à une activité de pulse magmatique ou de déformation tectonique, relative entre les deux sites. Si une déformation existe dans la zone, celle-ci affecte les deux sites de la même manière.



Géochimie des fluides

• A Terre :

Les secteurs principaux d'émissions de gaz hydrothermaux riches en CO₂ sont i) celui dit de « La plage de l'aéroport » au nord-est de l'aéroport de Petite Terre et proche de l'usine de désalinisation et ii) les zones de bullages au sein du lac Dziani. Pour plus de détails, voir les bulletins N° 1 et N° 4 du REVOSIMA (www.ipgp.fr/revosima).

Le CO₂ est un gaz incolore et inodore. Ces émissions pourraient avoir des flux conduisant à des concentrations élevées localement, en fonction du flux et des forçages météorologiques locaux (hygrométrie, température, vitesse et direction du vent) et de la topographie qui occasionne à terre l'accumulation du CO₂ et du Rn par exemple dans les points bas et les zones non ventilées.

L'analyse des zones de bullage a montré de faibles, mais significatives, variations de la composition chimique des émissions gazeuses par rapport aux valeurs historiques de référence (données BRGM 2005-2008). Ces variations pourraient être en lien avec l'évolution des flux de magma qui alimentent l'activité de l'éruption sous-marine. La cartographie des émissions de gaz par le sol a mis en évidence des flux qui augmentent de l'ouest (Dzaoudzi) à l'est (plage de l'aéroport) de Petite Terre.

Depuis novembre 2020, une station de suivi en continu des émissions de CO₂ par le sol a été installée par l'OVPF/IPGP à proximité de la plage de l'aéroport (station UDMN, **Figure 11**). En effet, parmi les espèces gazeuses, le CO₂ est exsolu des magmas à des profondeurs correspondant à celles du manteau et est ainsi connu pour fournir des indices fondamentaux sur les processus magmatiques profonds (Piton de la Fournaise : *Di Muro et al., 2016 ; Boudoire et al., 2017, 2018 ; Etna : Liuzzo et al., 2013 ; El Hierro : Perez et al., 2012*).

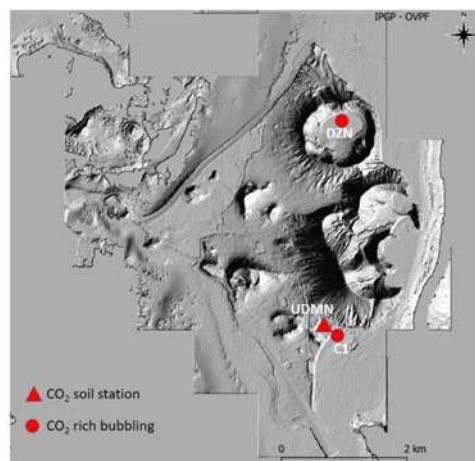


Figure 11 : Sites surveillés du réseau géochimique de Mayotte. Les variations du flux de CO₂ dans le sol sont étroitement liées aux processus magmatiques profonds qui peuvent avoir lieu au niveau du manteau (Liuzzo et al., 2021). La composition chimique et isotopique des bullages de gaz est potentiellement influencée par des processus se produisant dans le système hydrothermal crustal (©OVPF-IPGP / REVOSIMA).

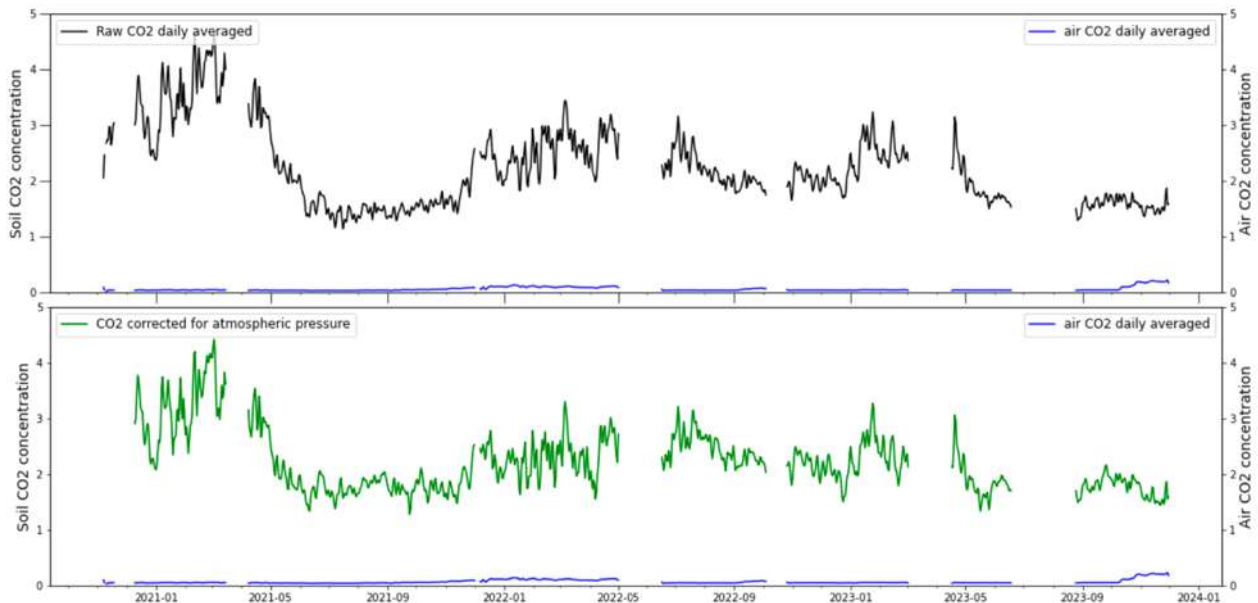


Figure 12 : Concentration en CO₂ dans le sol à la station permanente UDMN. Comparaison entre les données brutes (noir) et les données corrigées de l'influence de la pression atmosphérique (vert). Bleu : concentration dans l'air (1 m au-dessus du sol). Les variations de concentrations dans l'air sont liées à l'activité biogénique (©OVPF-IPGP / REVOSIMA).

Un échantillonnage de gaz récurrent est effectué (i) à partir des gaz du sol à la station de CO₂ UDMN pour l'analyse des isotopes du carbone ($\delta^{13}\text{C}$) du CO₂ et (ii) à partir des bullages de gaz hydrothermaux à l'aéroport (site C1, **Figure 11**) et dans le lac Dziani (site DZN, **Figure 11**) pour les gaz nobles (en particulier rapport isotopes hélium : $^3\text{He}/^4\text{He}$), les isotopes carbone ($\delta^{13}\text{C}$) du CO₂ et les températures d'équilibre CO₂/CH₄. Des augmentations de $^3\text{He}/^4\text{He}$ ont souvent été observées sur des volcans actifs étroitement liés aux remontées de magma profond (Rizzo *et al.*, 2015, 2016 ; Sano *et al.*, 2015).

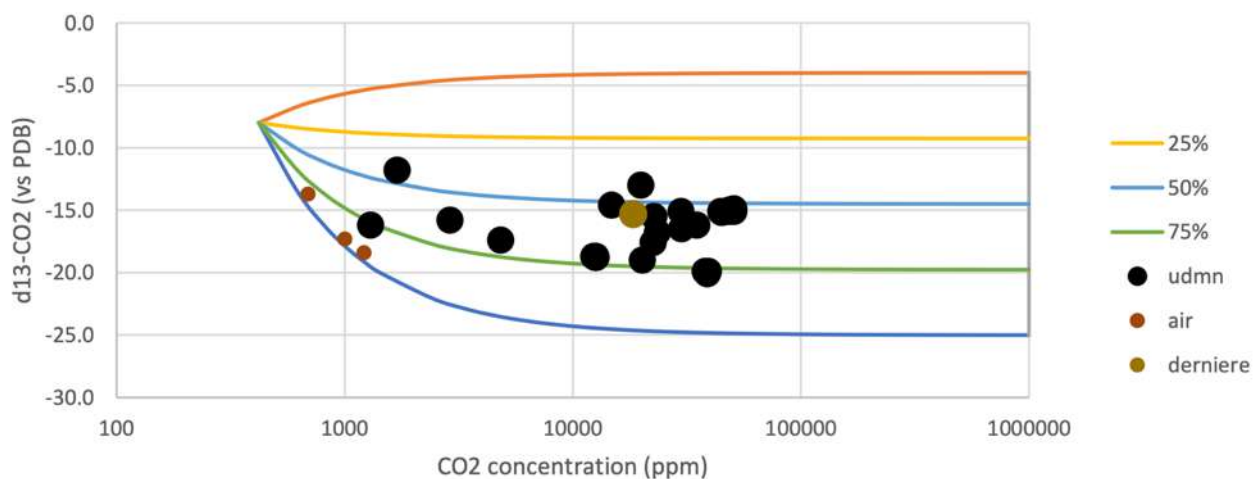


Figure 13 : Variations isotopiques du carbone ($\delta^{13}\text{C}$ -CO₂) du CO₂ dans l'air et dans les gaz du sol à la station UDMN. La composition du pôle magmatique est fixée à -4.0 per mil (signature des bullages du site C1 – estran de l'aéroport).

Les apports de magma profond sont susceptibles d'entraîner une augmentation de la concentration de CO₂ dans le sol et une signature isotopique moins négative. Les dernières mesures effectuées (point rouge) restent dans la moyenne de la composition des fluides émis par ce site.

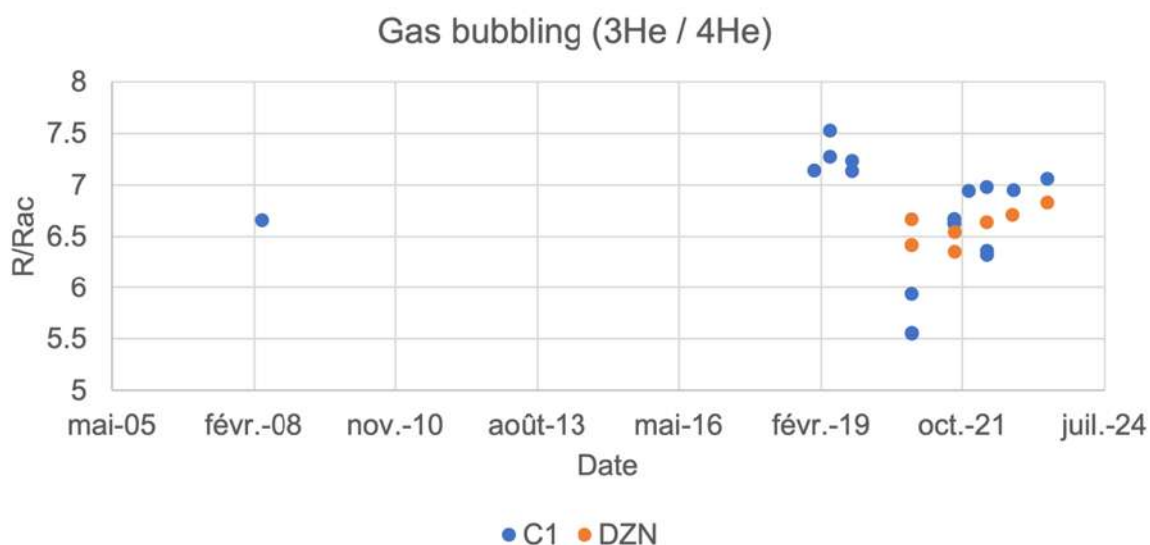


Figure 14 : Analyses isotopiques (gaz rares) des bullages aux points de contrôle C1 (estran de l'aéroport) et DZN (Lac Dziani) entre 2007 et 2022. Une augmentation du R/Ra (rapport isotopique de l'He normalisé à celui de l'atmosphère) est liée à une augmentation de la contribution des fluides profonds remontant du manteau. Erreur moyenne sur chaque analyse : 0.05 unité.

La contribution d'He mantellique a diminué de 86-82% en 2018-2019 à 80-63% en 2020-2022.

Le rapport He/Ar* (possible indicateur de pression à la source) a été peu variable entre 2018-2019 (1.41-1.25) et il est devenu plus variable entre 2020-2022 (1.83-0.71).

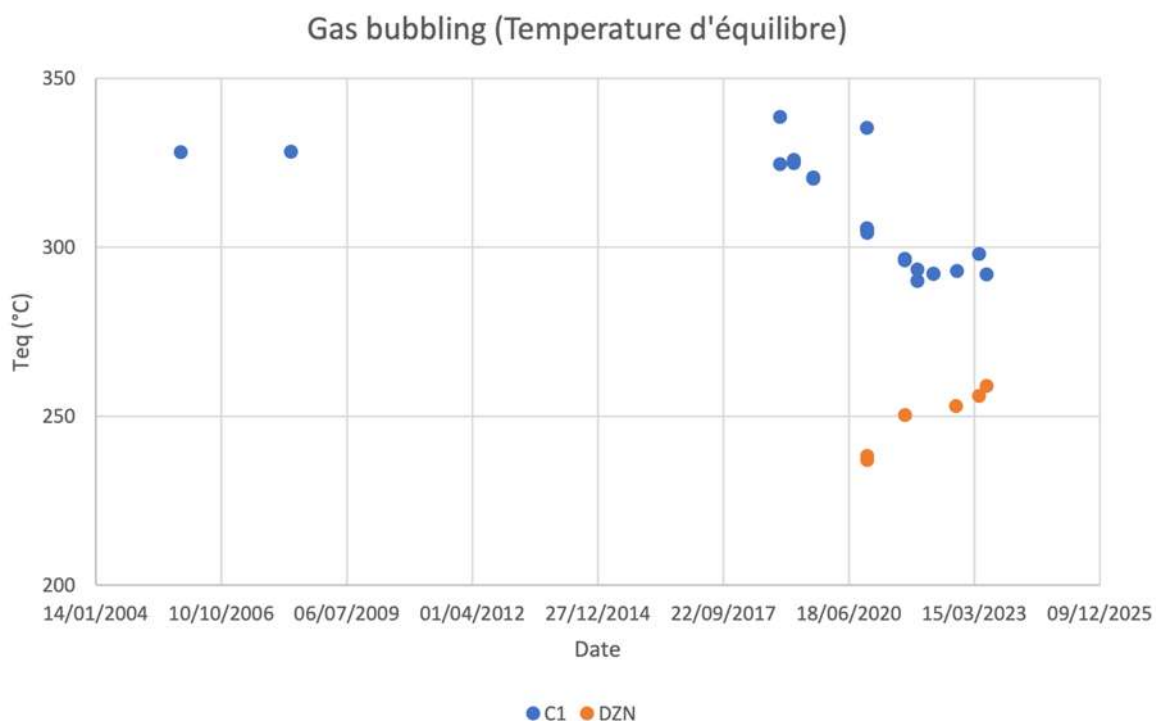


Figure 15 : Température d'équilibre des fluides au sein du système hydrothermal. La température d'équilibre entre le CO₂ et le CH₄ dans le système hydrothermal est estimée à l'aide de l'équation de Giggenbach 1992.



Une tendance à la baisse progressive de la température d'équilibre d'environ 50°C est observée depuis 2019 sur le site C1. Le site DZN enregistre des températures d'équilibre 65-45°C plus faibles par rapport au site C1. Depuis avril 2022, une possible stabilisation de l'évolution des températures d'équilibre semble avoir lieu.

Le Dziani Dzaha présente une composition chimique et biologique très contrastée par rapport à tous les systèmes aquatiques connus à ce jour. D'après les études menées entre 2010 et 2018 ce lac présente une énorme biomasse (lui conférant sa couleur verte permanente, *Leboulanger et al. (2017)* ; en diminution depuis 2018), une concentration en carbone inorganique dissous (DIC) très élevée (160 mM) avec une composition isotopique ($d^{13}C_{DIC}$) anormalement positive de +12,5‰ (*Cadeau et al., 2020*), et un pH très élevé, de 9,2 en moyenne (*Sarazin et al., 2021*). Ces caractéristiques rares, encore jamais documentées pour un lac, le rendent très sensible à toute augmentation du flux de CO_2 gazeux dans ses eaux, qui devrait abaisser à la fois son pH et la valeur de son $d^{13}C_{DIC}$. Le suivi de la chimie des eaux du Dziani Dzaha a pu reprendre en 2021 (*Cadeau et al., 2022*) en parallèle de celui de la chimie des gaz, suite à l'observation visuelle d'une intensification du bullage au centre du lac (nov. 2020). Comme qualitativement attendu suite à une injection de CO_2 , associé à des fluides magmatiques profonds d'origine mantellique, le pH a diminué drastiquement de 9,2 à 7,9 entre novembre 2020 et juin 2023 (**Figure 16**). Le $d^{13}C_{DIC}$ quant à lui a chuté brutalement entre novembre 2020 et septembre 2021 d'une valeur de 12,5‰ à une valeur de 9,8‰, valeur qui semble stabilisée depuis (**Figure 16**). La biomasse a quant à elle baissé de moitié mais reste encore très élevée.

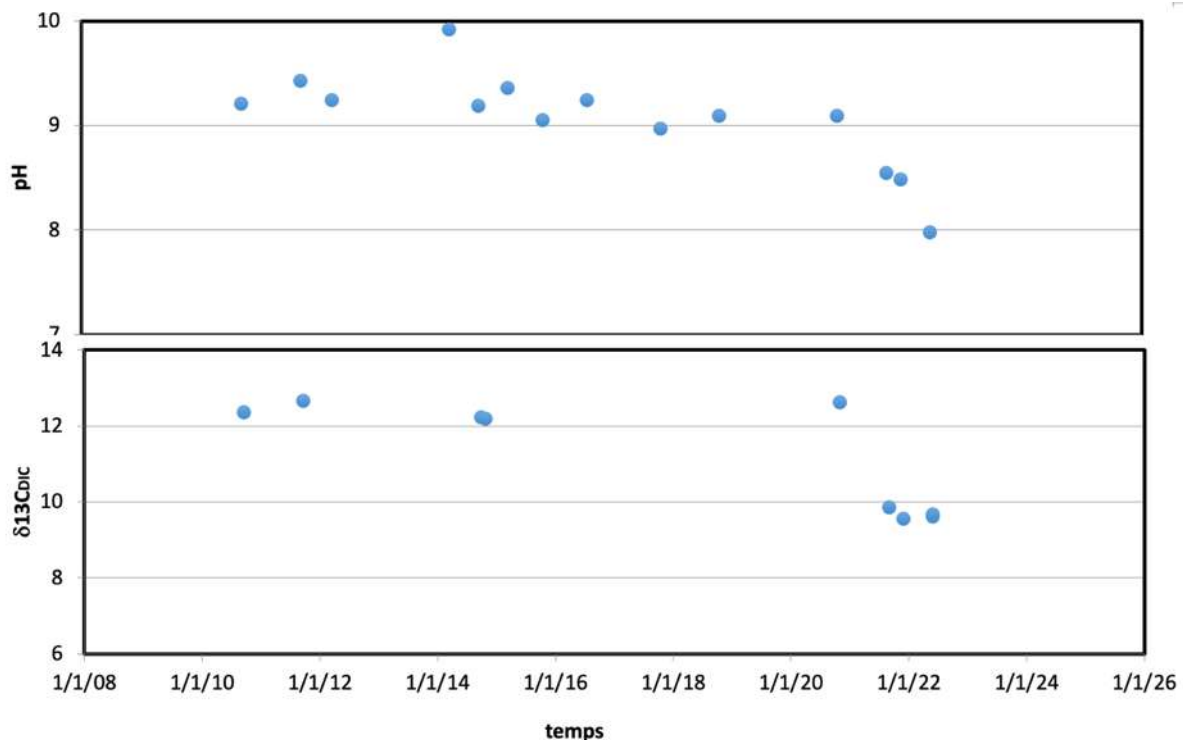


Figure 16 : Évolution temporelle du pH et du $d^{13}C_{DIC}$ des eaux du Dziani Dzaha entre 2010 et 2022 (données antérieures à 2015 (*Sarazin et al., 2021* ; *Cadeau et al., 2020*), données de 2014 à 2021 incluses (*Cadeau et al., 2022*)).

Depuis l'installation de la station UDMN en novembre 2020, une diminution progressive et ensuite une stabilisation des émissions de CO_2 par le sol (et de leur composition isotopique) est mesurée. L'évolution cyclique annuelle des émissions de CO_2 du sol est principalement contrôlée par l'évolution saisonnière des paramètres environnementaux. La variabilité des concentrations en CO_2 détectées dans l'air est contrôlée par la variabilité de l'apport biogénique.

La composition chimique des gaz hydrothermaux riches en CO_2 (bullages) collectés dans le point de contrôle avec la série temporelle la plus longue (C1 - estran de l'aéroport) indique une tendance à la diminution progressive de l'apport



des fluides profonds mantelliques depuis avril 2019. Cette diminution s'accompagne d'une baisse continue des températures d'équilibre des fluides au sein du système hydrothermal (environ 50°C).

La contribution de fluides profonds mantelliques ainsi que les températures d'équilibre au sein du système hydrothermal sont plus faibles pour le point de contrôle DZN au sein du lac Dziani Dzaha par rapport au site de contrôle de l'estran de l'aéroport.

En réponse à une augmentation de l'intensité du dégazage de CO₂ dans le lac, la chimie du Dziani Dzaha indique depuis novembre 2020 une forte diminution du pH (de 9,2 à 7,9) et une nette évolution de la composition isotopique du carbone inorganique dissous dans le lac (d¹³C_{DIC} passant de +12,5 à +9,8‰). Or, la spéciation du carbone dans l'eau et son état (dissous/gazeux) dépend principalement du pH. Si le pH continue sa baisse et atteint la valeur de 7 environ, la pression partielle de CO₂ dissous deviendra égale à 1 atm (1 atmosphère ou 1013 hPa), ce qui provoquera un dégazage de CO₂ de type ébullitif sur toute la surface du lac (équivalent au pétilllement d'un verre d'eau gazeuse).

La signature isotopique du C_{DIC} quant à elle montre une contribution de carbone provenant de fluides magmatiques profonds d'origine mantellique et une évolution temporelle dans cette contribution (Liuzzo et al., 2022).

- **En mer :**

Des panaches acoustiques associés à des anomalies géochimiques ont été détectés dans la colonne d'eau au-dessus de cette structure du Fer à Cheval, dont la hauteur peut atteindre 1000 m et qui sont visibles jusqu'à 500 m de la surface de la mer.

Au total, 22 sites actifs étaient identifiés dans la zone du Fer à Cheval en date du 22/07/2022, avec 5 sites actifs à l'extérieur de la structure : un au nord-ouest, deux au nord, un à l'est et un au sud du Fer à Cheval (Figure 17).

La chronologie de l'observation par acoustique des sites actifs d'émission de fluides sur la zone du Fer à Cheval suit le schéma suivant : sites A0 et B0 depuis mai 2019, site C0 depuis août 2019, sites D0 et E0 depuis mai 2020, sites C1 et F0 actifs depuis octobre 2020 en simultané à une expansion vers le nord-ouest des sites A0 et B0 (observation des nouveaux sites B1, A1 et A2), sites G0, D1, C2+C3 et C4 entre janvier et mai 2021, site H0 observé le 10 juillet 2021. Le site actif I0 a été observé le 20 septembre 2021 lors de la couverture acoustique de surveillance du Fer à Cheval pendant la campagne MAYOBS21 (Rinnert et al., 2021) ainsi que les sites D2 et C5 en analyse à terre post-campagne. Le site actif I0 a été observé le 20 septembre 2021 lors de la couverture acoustique de surveillance du Fer à Cheval pendant la campagne MAYOBS21 (Rinnert et al., 2021c) ainsi que les sites D2 et C5 en analyse à terre post-campagne. Le site J0, situé au sud à l'extérieur du Fer à Cheval a été identifié au cours de la campagne MD239-MAYOBS23 (Jorry et al., 2022) le 10 juillet 2022. L'analyse détaillée post-campagne des données acoustiques colonne d'eau acquises pendant MAYOBS23 révèle l'observation de deux nouveaux sites en plus du site J0 : I1 à environ 240 m au sud-ouest du site I0 et D3 sur le flanc intérieur est. **Enfin un nouveau site actif d'émission nommé K0 a été observé dans le prolongement du flanc ouest du Fer à Cheval lors de la dernière campagne en mer MD242-MAYOBS25 (Thinon et Lebas, 2023).** L'analyse préliminaire des données acquises lors de MD242-MAYOBS25 a permis de valider la pérennité de l'activité d'émission de fluides sur les sites identifiés lors des campagnes précédentes (22 sites observés en juillet 2022 – MAYOBS23) et le nouveau site K0. L'activité de trois sites (F0, C4 et I0) reste à déterminer à partir d'une analyse plus approfondie : soit le signal est trop faible pour être détecté ou inexistant soit l'activité des sites adjacents s'est intensifiée rendant leur discrimination spatiale difficile. Comme par le passé, dans des conditions de courants faibles et à marée basse, certains des panaches continuent d'atteindre des hauteurs très importantes (une valeur minimale de 350 m sous la surface de l'eau, soit parfois plus de 1000 m de hauteur depuis le fond marin).

En absence des plongées AUV (non prévues pour la campagne MAYOBS25), il ne sera pas possible de suivre l'évolution détaillée du nombre des points d'émission pour les sites habituellement observés à partir des données acoustiques acquises avec l'AUV. Le dénombrement des points d'émission, en particulier pour les sites E0, G0, H0, I0, I1 et J0, était un indicateur robuste de l'évolution interannuelle du niveau d'activité et de l'emprise spatiale pour chaque site.

Les équipes des Quarts Scientifiques, qui observent en temps réel les données des sondeurs acquises, ont souligné que si tous les sites d'émission de fluides observés lors de MAYOBS23 (A à J ; juillet 2022) ont été identifiés en septembre 2023, beaucoup semblent être plus importants. Ces observations doivent être validées par une analyse fine post campagne. Sous des conditions marines optimales (courants faibles, marée à l'éta), les panaches ne sont pas ou peu cisailés et atteignent des hauteurs importantes : la remontée des panaches les plus actifs peuvent atteindre une profondeur minimale de 350 m sous la surface de la mer (site E). Ces hauteurs sont à confirmer et à analyser en termes d'augmentation ou pas de flux (dans la mesure du possible).



Les panaches acoustiques et géochimiques restent donc fortement actifs dans la zone du Fer à Cheval. **Les fluides émis en fond de mer et collectés lors de la campagne GEOFLAMME sont composés majoritairement de dioxyde de carbone CO₂ (99,0 ± 0,3 %_{vol}), avec une faible contribution de méthane CH₄ (0,8 ± 0,2 %_{vol}) et de dihydrogène H₂ (10 à 1000 ppm_{vol}). La signature isotopique du carbone stable (¹³C) montre que le CO₂ est d'origine mantellique et suggère que le CH₄ est quant à lui d'origine abiologique, bien qu'une contribution mixte biogénique/thermogénique (i.e. issu d'une transformation de matière organique) ne puisse être complètement exclue. L'hélium et sa signature isotopique (³He/⁴He) mesurés sur les panaches indiquent une source mantellique, confirmant l'origine magmatique profonde des fluides, obtenue avec les isotopes stables du carbone. Les signatures élémentaires et isotopiques des différents gaz constituant les fluides émis au niveau du Fer à Cheval sont similaires aux gaz émis à terre au niveau de Petite-Terre.** La poursuite des analyses des panaches en mer permettra d'observer l'évolution spatiale et temporelle du processus en cours.

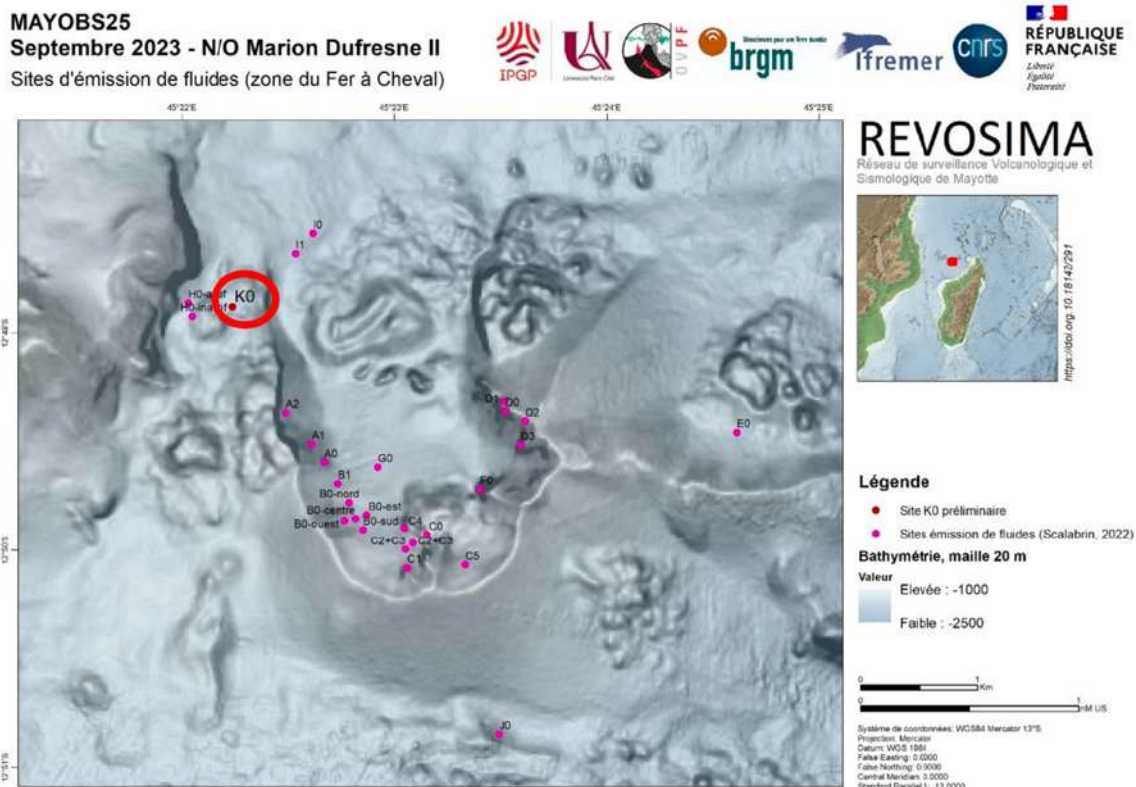


Figure 17 : Localisation des sites actifs d'émission de fluides fond de mer dans le périmètre élargi du Fer à Cheval (@Scalabrin, 2023- <https://doi.org/10.12770/070818f6-6520-49e4-bafd-9d4d0609bf7d>). Le nouveau site actif K0 observé (@Scalabrin & A. Potier) pour la première fois pendant la campagne MAYOBS25 y est intégré (entouré en rouge) (©REVOSIMA).

Mesures des propriétés physico-chimiques de la colonne d'eau entre 0 et 1000 m de profondeur par planeur autonome sous-marin

Le déploiement du drone sous-marin autonome de type planeur SeaExplorer au large de Mayotte (accord-cadre conclu entre l'Ifremer, et la société Alseamar, filiale du groupe Alcen, www.alseamar-alcen.com), à 10-15 km des côtes Est de Mayotte est reconduit pour l'année 2023. Les capteurs de mesure sont actuellement en maintenance mais un jeu de remplacement est opérationnel. En parallèle, une phase de développements techniques est menée pour accroître les performances analytiques d'une nouvelle version prévue pour atteindre des profondeurs autour de 1200 m et qui serait déployée en septembre 2023.



L'un des objectifs de la campagne MAYOBS25 (11-28 septembre 2023 ; *Thinon et Lebas, 2023*) était d'effectuer l'inter-comparaison à partir des mesures in situ de concentration de gaz dissous (méthane CH₄ et dioxyde de carbone CO₂) obtenues par la bathysonde CTD-Rosette avec celles mesurées par les capteurs des planeurs sous-marins déployés sur la zone depuis septembre 2021 (planeur 1000 m) et depuis juillet 2023 avec un planeur 1250 m.

Les données préliminaires des planeurs montrent que 1) les données ADCP permettent de détecter avec acuité la présence des panaches de gouttelettes émis par les sites actifs du Fer à Cheval et que 2) les capteurs de gaz dissous ont en première analyse détecté des concentrations de gaz dissous en accord avec les concentrations attendues dans le milieu. Ces résultats sont très préliminaires. Une étude plus conséquente sera entreprise sur l'inter-comparaison des valeurs, lorsque les données de concentrations de CH₄ et CO₂ des prélèvements effectués par la CTD-Rosette seront disponibles.

Magnétotellurique

La méthode magnétotellurique ou MT (*Vozoff, 1972*) permet d'investiguer la structure géo-électrique du sous-sol par l'étude des relations entre le champ électrique et le champ magnétique naturel terrestre, au travers de la propriété physique de résistivité électrique, de centaines de mètres à plusieurs centaines de kilomètres. Elle est couramment utilisée pour détecter des zones conductrices en profondeur (caprock de réservoir géothermique, aquifères, systèmes hydrothermaux, minerais, systèmes magmatiques...). Dans le cadre du suivi volcanique de Mayotte, la qualité du signal dépend de l'activité solaire et des conditions de bruits anthropiques.

Trois stations magnétotelluriques permanentes sont installées à Mayotte à proximité de la plage de Moya, du Mont Combani et sur le terrain de l'Aéroport de Dzaoudzi. Ces stations enregistrent le champ électromagnétique naturel à l'aide de sondes magnétiques à induction et de dipôles électriques à une fréquence d'échantillonnage de 128 Hz (**Figure 18**). La qualité des sondages et des données dépend essentiellement des deux paramètres suivants : i) la qualité du contact au niveau des électrodes, qui est liée à l'humidité du sol donc impactée par le climat local, l'exposition des sols au soleil, la perméabilité du milieu d'implantation, ii) le niveau de bruit électromagnétique ambiant des sites.

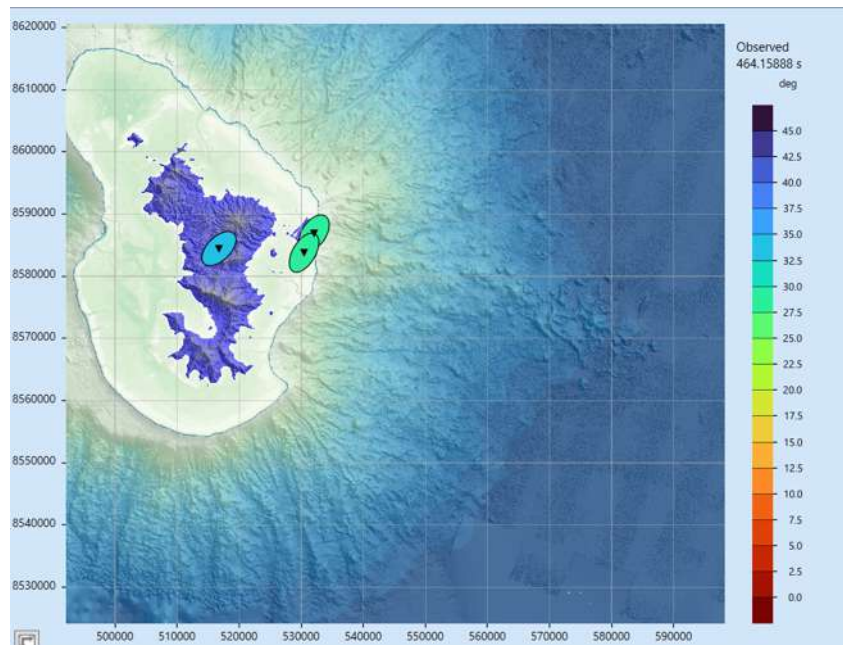


Figure 18 : Carte de tenseurs de phases calculés à 464 secondes des 3 stations MT du Revosima pour le mois de novembre 2023 (©BRGM et REVOSIMA).



Les données sont traitées quotidiennement sur des séries temporelles d'une longueur de 2 jours. Des chroniques temporelles de résistivité apparentes et de phases sont obtenues sur le mois. Un sondage MT mensuel est réalisé par calcul sur l'intégralité des données (résistivité apparente et phase en fonction de la fréquence) et un modèle de résistivité en fonction de la profondeur pour chaque site (par inversion 1D).

Pour ce bulletin nous considérons les données des 3 sites du 1^{er} au 30 novembre 2023. La station de Moya a connu des perturbations anthropiques entre le 26 et le 30 novembre. Les données n'ont pu être récupérées.

Les sondages MT de Moya et de l'Aéroport du mois de novembre 2023 sont associés à des tenseurs de phases (ellipses) dont le grand axe est orthogonal à l'axe de la ride océanique (N120-N130°), ce qui est un indicateur de qualité des données MT.

Les chroniques temporelles des résistivités apparentes et phases de l'invariant 1D des sondages MT de Combani, Moya et Aéroport sont également présentées sur la **Figure 21** en regard de l'index géomagnétique Kp qui témoigne de l'activité du soleil. La station Moya ayant eu un dysfonctionnement sur la période 26-30 novembre, cela impacte les chroniques temporelles : pas de données sur cette période pour les stations Moya et Combani.

Les sondages MT des 3 sites du réseau sont présentés en **Figure** en compagnie de leurs variabilités (sur les résistivités apparentes et phases). Les coupes de résistivités en profondeur comparées des mois de juillet, août, septembre et octobre 2023 (**Figure 19**). Les modèles sont similaires. Les faibles variations de conductivités sont liées à des variations de signal sur bruit entre les mois de juillet, août, septembre et octobre 2023. Les alternances conducteurs-résistant sont respectées. Les 3 sites montrent un conducteur profond au-delà de 20km.

Aucune variation significative dans les structures géo-électriques du sous-sol n'est constatée par le réseau MT Revosima en novembre 2023 par rapport à octobre, septembre, août et juillet.

Note Technique :

Un sondage MT est calculé mensuellement à partir des données MT du réseau. Celui-ci est constitué de deux tenseurs représentant des propriétés physiques du milieu investigué, au travers des relations entre les deux composantes du champ électrique (x ou NS et y ou EW) et du champ magnétique (x ou NS et y ou EW) :

- Le tenseur de résistivité apparente, qui représente pour chaque période une moyenne géométrique de la résistivité électrique du milieu sous la station depuis la surface jusqu'à une profondeur limite (cette profondeur augmente quand la fréquence diminue). De faibles valeurs indiquent des milieux conducteurs.
- Le tenseur de phase, qui exprime le retard généré par le milieu investigué, entre chaque composante de champ magnétique et électrique. Lorsque l'onde rencontre un milieu conducteur, un décalage de phase est observé.

Pour chaque site de mesures, sont donc estimées 4 composantes de résistivité apparente (ρ_{xy} , ρ_{yx} , ρ_{xx} , ρ_{yy}) et 4 composantes de phase (ϕ_{xy} , ϕ_{yx} , ϕ_{xx} , ϕ_{yy}) qui constituent ensemble un sondage magnétotellurique. Au vu de la multitude et de la complexité des observables MT, est également calculé un sondage simplifié, où la géologie est ramenée à un milieu 1D, tabulaire (succession de couches de résistivité différentes) : le déterminant du tenseur d'impédance magnétotellurique fournit ainsi une composante résistivité apparente ρ_{det} et une phase ϕ_{det} . Pour chaque sondage, un modèle de résistivité 1D est proposé.

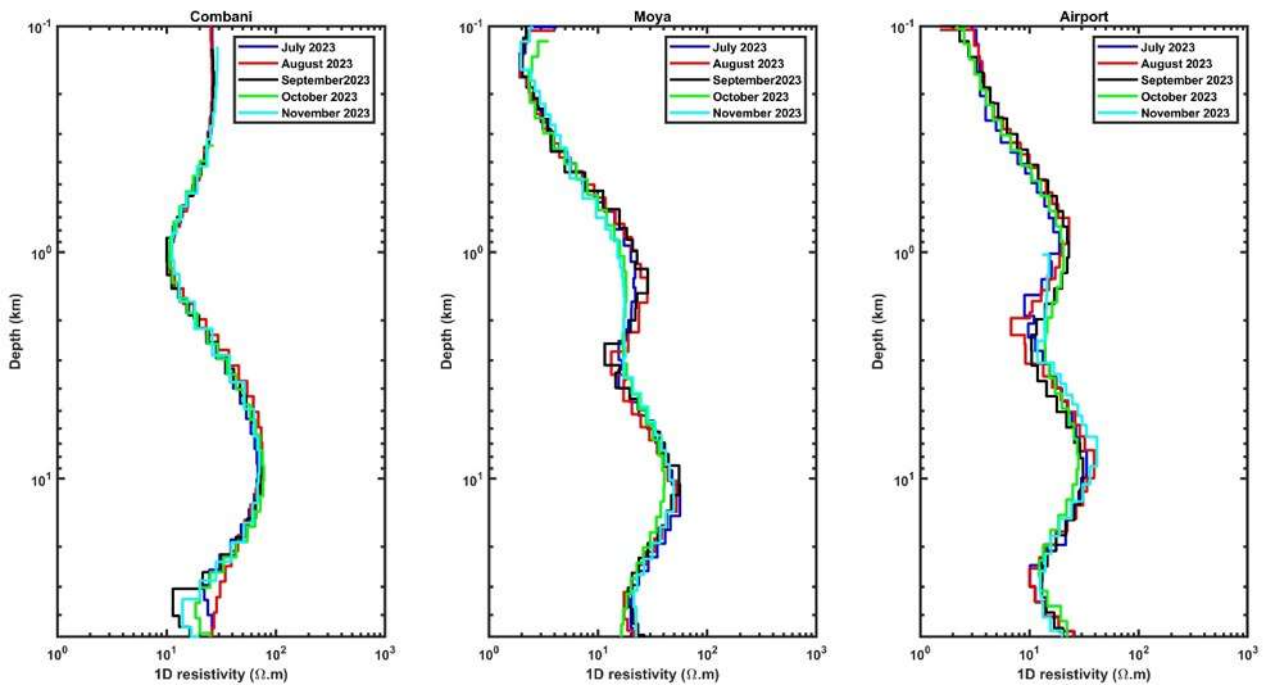


Figure 19 : Modèles 1D de résistivité du sous-sol de 100m à 100km de profondeur sous Combani (gauche), Moya (centre) et Aéroport (droite) pour les mois de juillet (bleu), août 2023 (rouge), septembre 2023 (noir), octobre 2023 (vert) et novembre 2023 (cyan).

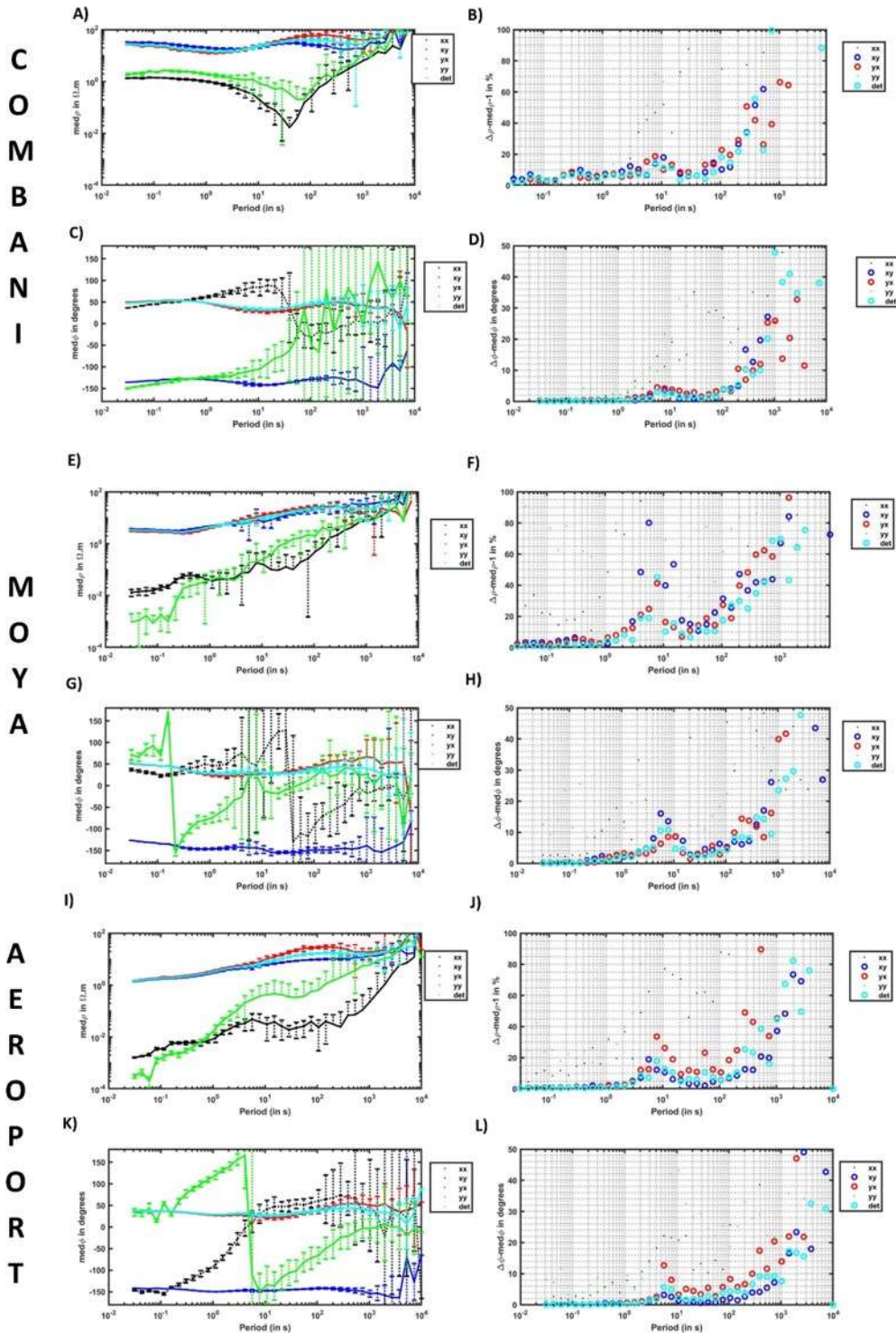


Figure 20 : Sondages MT (a, c, e, g, i, k), i.e. résistivités apparentes (a, e, i) et phases (c, g, k) en fonction de la période (secondes) de 64Hz à 10000s du réseau MT Revosima (©BRGM et REVOSIMA), variabilités mensuelles relatives de résistivités apparentes en % (b, g, j) et variabilités absolues de phases en degrés (c, h, l).

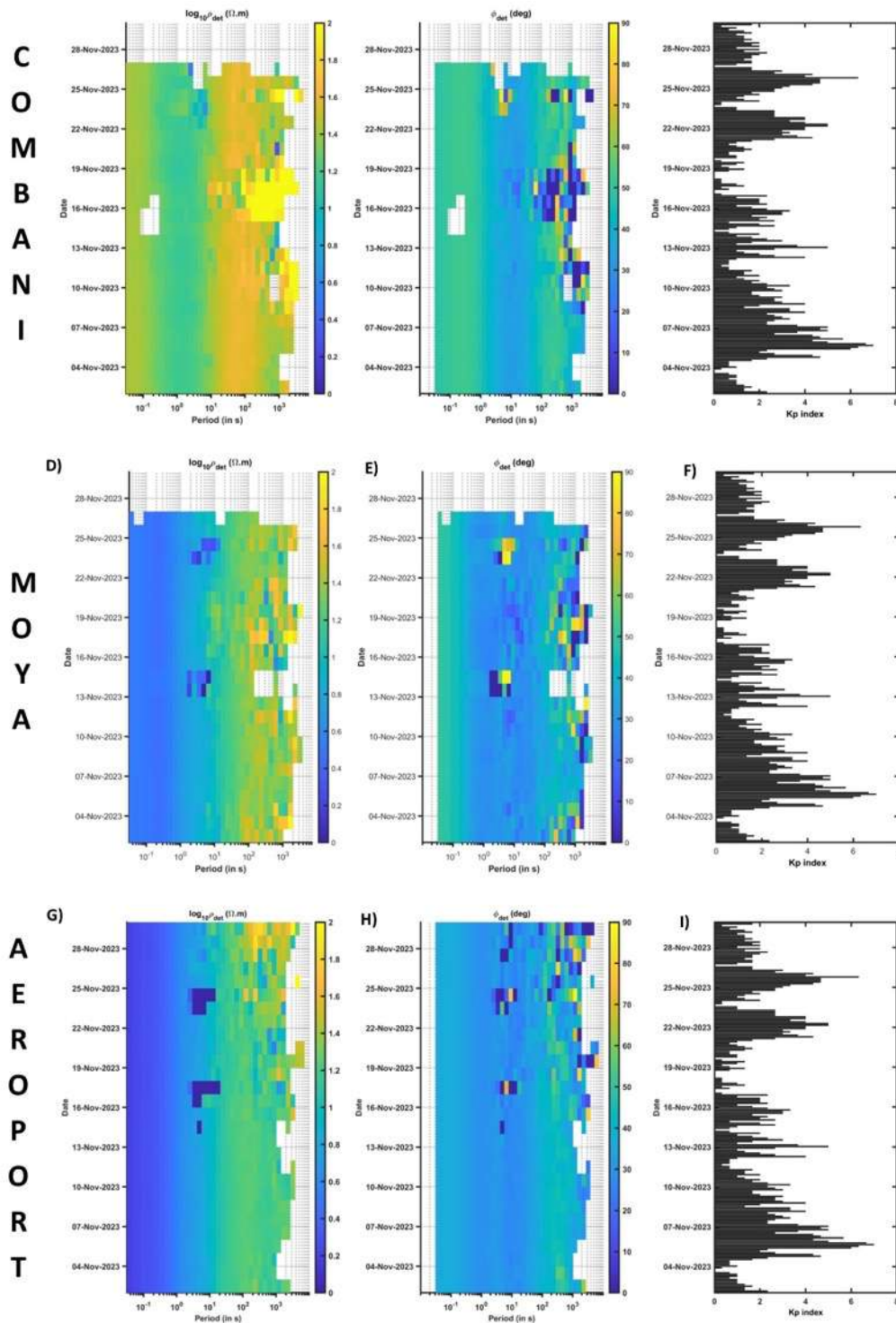


Figure 21 : Période du 01/11/2023 au 30/11/2023 - Chroniques temps-période de résistivité apparente de l'invariant 1D MT en échelle logarithmique (a, d, g), de phases (b, e, h) et index géomagnétiques Kp (c, f, i) du réseau MT Revosima (©BRGM et REVOSIMA) pour le site de Combani (haut), Moya (centre) et Aéroport (bas).



Phénoménologie

• En mer :

Sur la zone de l'édifice volcanique et en l'état actuel des connaissances, l'ensemble des données bathymétriques acquises lors des différentes campagnes MAYOBS (*Rinnert et al., 2019*) montrent que l'éruption a produit, en date de fin octobre 2021, un volume estimé d'environ 6,55 km³ de lave (sous réserve de calculs plus précis) depuis le début de son édification (sans correction de la vésicularité très variable des laves émises). Selon les différents modèles et interprétations proposées à ce jour, l'éruption aurait pu débuter le 18 juin 2018 (modèle de *Cesca et al., 2020*), voire le 3 juillet 2018 (modèle de *Lemoine et al., 2020*). Sur une période de 10 mois (de juillet 2018 - début des déformations de surface enregistrées à Mayotte – au 18 mai 2019), le flux éruptif minimum moyen de lave a été d'environ 172-181 m³/s sur une durée maximale de 320 à 336 jours. Depuis la découverte de l'édifice volcanique, quatre nouveaux points de sortie distants ont été identifiés et ont produit : 1) au sud environ 0,2 km³ de lave en 30 jours (19 mai-17 juin 2019) pour un flux minimum moyen de l'ordre de 77m³/s ; 2) à l'ouest environ 0,3 km³ de lave en 43 jours (entre le 18 juin et le 30 juillet 2019) pour un flux minimum moyen de 81 m³/s ; 3) au nord environ 0,08 km³ de lave en 21 jours (entre le 31 juillet et le 20 août 2019) pour un flux minimum moyen de l'ordre de 44 m³/s. ; 4) au nord-ouest environ 0,8 km³ de lave en 265 jours maximum (entre le 21 août 2019 et le 11 mai 2020) pour un flux minimum moyen de l'ordre de 35 m³/s ; 5) au nord-ouest entre 0,1 à 0,2 km³ de lave en 153 jours (entre le 11 mai et le 11 octobre 2020) pour un flux minimum moyen de l'ordre de 11 m³/s. La campagne MAYOBS17 (*Thinon et al., 2021*) a montré que de nouvelles émissions de lave ont eu lieu sur le site au nord-ouest entre fin octobre 2020 et le 18 janvier 2021. La campagne de surveillance MAYOBS18 (du 09 au 13 avril 2021 ; *Rinnert et al., 2021a*) n'a pas mis en évidence la présence de nouvelles coulées de lave dans la zone nord-ouest. **Lors des trois dernières campagnes sur site, MAYOBS21 (13 septembre au 4 octobre 2021 ; *Rinnert et al., 2021c*), MAYOBS23 (9 au 22 juillet 2022 ; *Jorry et al., 2022*) et MAYOBS25 (11 au 28 septembre 2023 ; *Thinon et Lebas, 2023*), à nouveau, aucune nouvelle coulée de lave n'a été mise en évidence dans le secteur de Fani Maoré. Depuis début 2021, l'éruption est probablement arrêtée mais aucune hypothèse n'est pour l'instant écartée quant à l'évolution de la situation à venir (arrêt définitif, reprise de l'activité éruptive sur le même site, reprise de l'activité éruptive sur un autre site), compte tenu de l'activité sismique persistante et d'émissions de fluides localisées dans la zone du Fer à Cheval.**

Les volumes et flux éruptifs, notamment au début de la crise, ont été exceptionnels et ont été, compte tenu des incertitudes, globalement les plus élevés observés sur un volcan effusif depuis l'éruption du Laki (Islande) en 1783 dont le flux moyen éruptif avait été estimé à 694 m³/s sur 245 jours d'éruption (*Thordarson et Self, 1993*).

Afin de mieux caractériser la bathymétrie à proximité de la côte et pour palier à l'absence de données bathymétriques proche des côtes, des données ultra-côtières ont été acquises lors des campagnes MAYOBS18 (du 09 au 13 avril 2021 ; *Rinnert et al., 2021a*) et MAYOBS19 (du 27 mai au 01 juin 2021 ; *Rinnert et al., 2021b*) complétant ainsi une partie de la cartographie du tombant récifal de Petite-Terre entre la passe de Longoni et la zone nord-est de Petite-Terre. **Lors de la dernière campagne MD242-MAYOBS25 (du 11 au 28 septembre 2023, *Thinon et Lebas, 2023*), aucune modification majeure dans la morphologie et la topographie du fond marin n'a été détectée à la résolution du système d'acquisition du sondeur multifaisceaux coque au niveau de la côte de Mayotte.**

Géologie

Les six dragages de la campagne MAYOBS21 (13 septembre au 4 octobre 2021 ; *Rinnert et al., 2021c*) ont permis d'échantillonner avec succès quatre petits édifices pyroclastiques anciens dans la zone du Fer à Cheval, de la Couronne et de la chaîne volcanique à l'Est du Fer à Cheval, formés par l'activité volcanique explosive, ainsi que deux coulées de lave distales des premières phases d'activité du nouveau volcan. **Des prélèvements géologiques par drague à roche ont également été réalisés lors de la campagne MD239-MAYOBS23 (9 au 22 juillet 2022 ; *Jorry et al., 2022*) sur 6 sites. Sur tous ces sites du matériel pyroclastique sur des cônes volcaniques anciens issus d'une activité sous-marine explosive a été prélevé.**

Lors de la campagne MD242-MAYOBS25 (11 au 28 septembre 2023, *Thinon et Lebas, 2023*), trois nouveaux dragages ont permis d'échantillonner avec succès dans la zone du Fer à Cheval deux coulées phonolitiques et un dôme/coulée phonolitique qui semblent récentes (Figure 22). Des enclaves probablement d'origine mantellique et/ou crustale ont été retrouvées dans certains fragments de ces trois dragages. Les analyses en géochimie de roche



totale des coulées de lave draguées à proximité du Fer à Cheval (DR36, DR37, DR38) lors de la campagne MD242-MAYOBS25 montrent des compositions de phonolites peu évoluées typiques de la majorité des phonolites échantillonnées dans la zone du Fer à Cheval.

MAYOBS25
Septembre 2023 - N/O Marion Dufresne II
Position des dragues

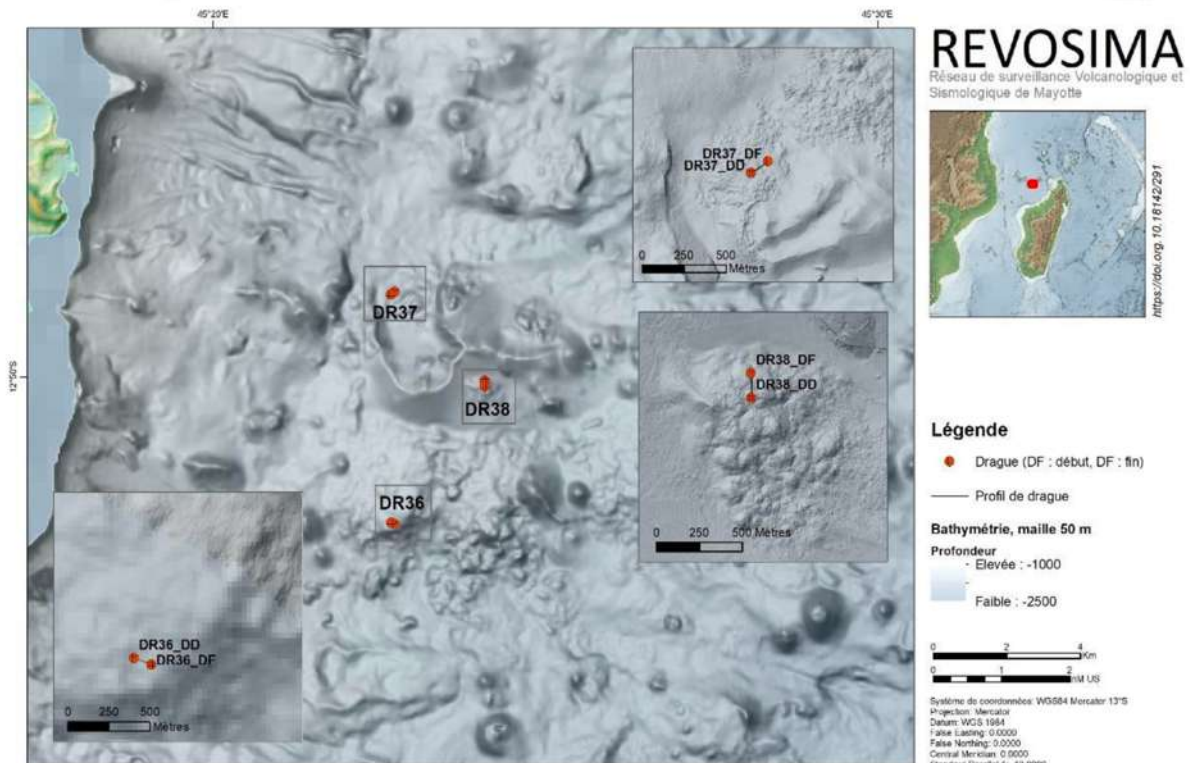


Figure 22 : Localisation des trois dragues obtenues lors de la campagne MD242-MAYOBS25 (© REVOSIMA).

Tous ces échantillons ont une importance significative car ils permettront de :

- Mieux contraindre l'origine, la teneur en gaz, la composition chimique et le dynamisme éruptif de la zone du Fer à Cheval, une région qui a été la plus active de la chaîne volcanique et qui a produit une grande diversité de dynamismes éruptifs caractérisés par la prédominance d'éruptions explosives, à partir d'une multitude de petits édifices, ayant émis des magmas phonolitiques, riches en gaz, qui ont séjourné et évolué pendant des périodes longues dans la lithosphère, mais qui sont remontés rapidement en surface, ainsi que par l'émission de magmas basanitiques similaires à ceux éruptés sur le nouveau volcan;
- Compléter la compréhension du fonctionnement des systèmes magmatiques de la chaîne volcanique sous-marine orientale de Mayotte et notamment les liens entre les zones de production et de stockage magmatique de la région du Fer à Cheval et de la Couronne avec celles ayant été impliquées dans la formation du nouveau volcan Fani Maoré.

Le CSS du REVOSIMA,
le 5 décembre 2023



Références

- Audru et al. (2006), BATHYMAY : Underwater structure of Mayotte Island revealed by multibeam bathymetry / Bathymay : la structure sous-marine de Mayotte révélée par l'imagerie multifaisceaux. *Comptes Rendus Géosciences*, 338, 1240-1249. [10.1016/j.crte.2006.07.010](https://doi.org/10.1016/j.crte.2006.07.010)
- 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
- Berthod, C., Médard, E., Bachèlery, B., Gurioli, L., Di Muro, A., Peltier, A., Komorowski, J.-C., Benbakkar, M., Devidal, J.-L., Langlade, J., Besson, P., Boudon, G., Rose-Koga, E., Deplus, C., Le Friant, A., Bickert, M., Nowak, S., Thion, I., Burckel, P., Hidalgo, S., Kaliwoda, M., Jorry, S., Fouquet, Y., Feuillet, N. (2021a), The 2018-ongoing Mayotte submarine eruption: magma migration imaged by petrological monitoring. *Earth Planetary Science Letters*, 57, 117085, <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2021.117085>
- Berthod, C., Médard, E., Di Muro, A., Hassen Ali, T., Gurioli, L., Chauvel, C., Komorowski, J.-C., Bachèlery, P., Peltier, A., Benbakkar, M., Devidal, J.-L., Besson, P., Le Friant, A., Deplus, C., Nowak, S., Thion, I., Burckel, P., Hidalgo, S., Feuillet, N., Jorry, S., Fouquet, Y. (2021b), 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., Komorowski, J.-C., Gurioli, L., Médard, E., Besson, P., Bachèlery, P., Verdurme, P., Chevrel, O., Di Muro, A., Devidal, J.-L., Nowak, S., Thion, I., Burckel, P., Hidalgo, S., Deplus, C., Réaud, Y., Fouchard, S., Bickert, M., Le Friant, A., Feuillet, N., S., Fouquet, Y., E., Cathalot, C., Lebas, E. (2022), Temporal magmatic evolution of the Fani Maoré submarine eruption 50km East offshore Mayotte revealed by in situ submarine sampling and petrological monitoring, *Comptes Rendus. Géoscience*, Tome 354, no. S2, pp. 195-223; DOI : 10.5802/crgeos.155
- Bertil et al. (2019), MAYEQSwarm2019 : BRGM earthquake catalogue for the EarthquakeSwarm located East of Mayotte. 2018 May 10th - 2019 May 15th, <https://doi.org/10.18144/rmg1-ts50>
- Bertil, D., Mercury, N., Doubre, C., Lemoine, A., & Van der Woerd, J. (2021), The unexpected Mayotte 2018–2020 seismic sequence: a reappraisal of the regional seismicity of the Comoros. *Comptes Rendus. Géoscience*, 353(S1), 1-25
- Bouidoire, G., Di Muro, A., Liuzzo, M., Ferrazzini, V., Peltier, A., Gurrieri, S., Michon, L., Giudice, G., Kowalski, P. and Boissier, P. (2017), New perspectives on volcano monitoring in a tropical environment: continuous measurements of soil CO2 flux at Piton de la Fournaise (La Réunion Island, France). *Geophysical Research Letters*, 44, doi:10.1002/2017GL074237
- Bouidoire, G., Finizola, A., Di Muro, A., Peltier, A., Liuzzo, M., Grassa, F., Delcher, E., Brunet, C., Boissier, P., Chaput, M., Ferrazzini, V. and Gurrieri, S. (2018), Small-scale spatial variability of soil CO2 flux : implication for monitoring strategy. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 366, 13-26
- Briole et al. (2008), note de synthèse <http://volcano.itterre.fr/mayotte-seismo-volcanic-crisis>
Bulletin du BCSF de juillet 2018 : http://www.franceseisme.fr/donnees/Note_macro-BCSF-RENASS-Mayotte-13-07-2018.pdf
Bulletins mensuels OVPF/IPGP : www.ipgp.fr/fr/dernieres-actualites/344
- Cadeau, P., Jézéquel, D., Leboulanger, C., Fouilland, E., Le Floc'h, E., Chaduteau, C., Milesi, V., Guélard, J., Sarazin, G., Katz, A., d'Amore, S., Bernard, C., Ader, M. (2020), Carbon isotope evidence for large methane emissions to the Proterozoic atmosphere. *Sci. Rep.* 10, 18186. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-75100-x>
- Cadeau, P., Jézéquel, D., Groleau, A., Di Muro, A., Ader, M. (2022), Impact of the seismo-volcanic crisis offshore Mayotte on the Dziani Dzaha Lake. *Comptes Rendus Géoscience*, 1-18. doi : 10.5802/crgeos.172
- Cesca, S. et al. (2020), Drainage of a deep magma reservoir near Mayotte inferred from seismicity and deformation. *Nature Geoscience*, 13(1), 87-93.
- 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>
- Debeuf (2004), Étude de l'évolution volcano-structurale et magmatique de Mayotte, Archipel des Comores, océan Indien : approches structurale, pétrographique, géochimique et géochronologique. Thèse de doctorat soutenue à l'université de la Réunion
- Di Muro et al. (2019), rapport interne, OVPF-IPGP du 04-04-2019
- Di Muro, A., Métrich, N., Allard, P., Aiuppa, A., Burton, M., Galle, B. and Staudacher, T. (2016), Magma degassing at Piton de la Fournaise volcano. In *Active Volcanoes of the Southwest Indian Ocean* (pp. 203-222). Springer, Berlin, Heidelberg
- Dorel, J., Feuillard, M. (1980), Note sur la crise sismo-volcanique à la Soufrière de La Guadeloupe 1975–1977, *Bull. Volcano.*, 43(2), 419-430
- Famin, V., Michon, L., & Bourhane, A. (2020), The Comoros archipelago: a right-lateral transform boundary between the Somalia and Lwandle plates. *Tectonophysics*, 789, 228539
- Feuillet, N. 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>
- Feuillet, N. (2019), MAYOBS1 cruise, RV Marion Dufresne, <https://doi.org/10.17600/18001217>
- Hanks, T. C., Kanamori, H. (1979), A moment magnitude scale, *Journal of Geophysical Research*, 84, 5, 2348 - 2350, 9B0059, Doi :10.1029/JB084iB05p02348
- Jorry, S., Paquet, F., Lebas, E. (2022), MAYOBS23 cruise, RV Marion Dufresne, <https://doi.org/10.17600/18002494>
- Lavayssière, A., Crawford, W. C., Saurel, J. M., Satriano, C., Feuillet, N., Jacques, E., & Komorowski, J. C. (2022), A new 1D velocity model and absolute locations image the Mayotte seismo-volcanic region. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 421, 107440, <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2021.107440>
- Lebas, E. (2022), MAYOBS22 cruise, RV OSIRIS II, <https://doi.org/10.17600/18003293>
- Lebas, E., Besançon, S. (2023), MAYOBS24 cruise, RV OSIRIS II, <https://doi.org/10.17600/18003294>



- Leboulanger, C., Agogué, H., Bernard, C., Bouvy, M., Carré, C., Cellamare, M., Duval, C., Fouilland, E., Got, P., Intertaglia, L., Lavergne, C., Le Floch, E., Roques, C., Sarazin, G. (2017), Microbial Diversity and Cyanobacterial Production in Dziani Dzaha Crater Lake, a Unique Tropical Thalassohaline Environment. *PLOS ONE* 12, e0168879. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0168879>
- 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>
- Liuzzo, M., Gurrieri, S., Giudice, G. and Giuffrida, G. (2013), Ten years of soil CO₂ continuous monitoring on Mt. Etna : Exploring the relationship between processes of soil degassing and volcanic activity. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 14(8), pp.2886-2899
- Liuzzo, M., Di Muro, A., Rizzo, A.L., Caracausi, A., Grassa, F., Fournier, N., Moreira, M., Shafik, B., Boudoire, G., Coltorti, M., Italiano, F. (2021), Gas geochemistry at Grande Comore and Mayotte volcanic islands (Comoros Archipelago, Indian Ocean). *G3*, e2021GC009870
- Liuzzo, M., Di Muro, A., Rizzo, A.L., Grassa, F., Coltorti, M., Ader, M. (2022), The composition of gas emissions at Petite Terre (Mayotte, Comoros): inference on magmatic fingerprints. *Comptes Rendus. Géoscience*, Online first (2022), pp. 1-24. doi : 10.5802/crgeos.148.
- Nehlig et al. (2013), Notice de la carte géologique de Mayotte, BRGM/RP-61803-FR, 135 p., 45 ill., 1 ann., 2013
- Pelleter et al. (2014), Melilitite-bearing lavas in Mayotte (France): An insight into the mantle source below the Comores. *Lithos*, Elsevier, 2014, 208-209, 281-297
- Peltier, A., Saur, S., Ballu, V., Beauducel, F., Briole, P., Chanard, K., Dausse, D., De Chabalière, J.B., Grandin, R., Rouffiac, P., Tranchant, Y.T. et al. (2022), Ground deformation monitoring of the eruption offshore Mayotte. *Comptes Rendus. Géoscience*, pp. 1-23. <https://doi.org/10.5802/crgeos.176>
- Pérez, N.M., Padilla, G.D., Padrón, E., Hernández, P.A., Melián, G.V., Barrancos, J., Dionis, S., Nolasco, D., Rodríguez, F., Calvo, D. and Hernández, Í. (2012), Precursory diffuse CO₂ and H₂S emission signatures of the 2011–2012 El Hierro submarine eruption, Canary Islands. *Geophysical Research Letters*, 39(16)
- Retailleau L., Saurel J.-M., Zhu W., Satriano C., Beroza G. C., Issartel S., Boissier P., OVPF Team, OVSM Team (2022a), A wrapper to use a machine-learning-based algorithm for earthquake monitoring, *Seismological Research Letter*, 93(3), 1673-1682.
- Retailleau, L., Saurel, J.M., Laporte, M., Lavyssière, A., Ferrazzini, V., Zhu, W., Beroza, G.C., Satriano, C., Komorowski, J.C. and OVPF Team (2022b), Automatic detection for a comprehensive view of Mayotte seismicity. *Comptes Rendus. Géoscience*, 354(S2), pp.1-18.
- Rinnert, E., Lebas, E., Paquet, F., Jorry, S., Feuillet, N., Thionon, I., Fouquet, Y. (2019), MAYOBS, <https://doi.org/10.18142/291>
- Rinnert, E., Thionon, I., Feuillet, N. (2020), MD 228 / MAYOBS15 cruise, RV Marion Dufresne, <https://doi.org/10.17600/18001745>
- Rinnert, E., Thionon, I., Lebas, E. (2021a), MAYOBS18 cruise, RV Pourquoi pas ?, <https://doi.org/10.17600/18001984>
- Rinnert, E., Paquet, F., Lebas, E. (2021b), MAYOBS19 cruise, RV Pourquoi pas ?, <https://doi.org/10.17600/18001985>
- Rinnert, E., Thionon, I., Lebas, E. (2021c), MAYOBS21 cruise, RV Marion Dufresne, <https://doi.org/10.17600/18001986>
- Rizzo, A.L., Federico, C., Inguaggiato, S., Sollami, A., Tantillo, M., Vita, F., Bellomo, S., Longo, M., Grassa, F. and Liuzzo, M. (2015), The 2014 effusive eruption at Stromboli volcano (Italy): Inferences from soil CO₂ flux and 3He/4He ratio in thermal waters. *Geophys. Res. Lett.*, 42, 2235–2243, doi:10.1002/2014GL062955
- Rizzo, A. L., Di Piazza, A., de Moor, J.M., Alvarado, G.E., Averd, G., Carapezza, M.L. and Mora, M.M. (2016), Eruptive activity at Turrialba volcano (Costa Rica): Inferences from 3He/4He in fumarole gases and chemistry of the products ejected during 2014 and 2015. *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 17, 4478-4494
- Sanjuan et al. (2008), Estimation du potentiel géothermique de Mayotte : Phase 2` Etape 2. Investigations géologiques, géochimiques et géophysiques complémentaires et synthèse des résultats, rapport final, BRGM/RP-56802-FR, 82 p., 18 fig., 3 tabl., 6 ann.
- Sano, Y., Kagoshima, N., Takahata, N., Nishio, Y., Roulleau, E., Pinti, D.L. and Fischer, T.P. (2015), Ten-year helium anomaly prior to the 2014 Mt Ontake eruption. *Scientific reports*, 5, 13069
- Sarazin, G., Jézéquel, D., Leboulanger, C., Fouilland, E., Le Floch, E., Bouvy, M., Gérard, E., Agogué, H., Bernard, C., Hugoni, M., Grossi, V., Troussellier, M., Ader, M. (2021), Geochemistry of an endorheic thalassohaline ecosystem: the Dziani Dzaha crater lake (Mayotte Archipelago, Indian Ocean). *Comptes Rendus Géoscience* 352, 559–577. <https://doi.org/10.5802/crgeos.43>
- Saurel, J. M., Jacques, E., Aiken, C., Lemoine, A., Retailleau, L., Lavyssière, A., et al. (2022), Mayotte seismic crisis: building knowledge in near real-time by combining land and ocean-bottom seismometers, first results. *Geophysical Journal International*, 228(2), 1281-1293, <https://doi.org/10.1093/gji/ggab392>
- Shom (2016), MNT Bathymétrie de façade de Mayotte (Projet Homonim). http://dx.doi.org/10.17183/MNT_MAY100m_HOMONIM_WGS84
- Sigmarrsson et al. (2015), *EPSL*, doi : 10.1016/j.epsl.2015.06.054
- Thionon, I., Rinnert, E., Feuillet, N. (2021), MAYOBS17 cruise, RV Pourquoi pas ?, <https://doi.org/10.17600/18001983>
- Thionon, I., Lemoine, A., Leroy, S., Paquet, F., Berthod, C., Zaragosi, S., et al., (2022), Volcanism and tectonics unveiled in the Comoros Archipelago between Africa and Madagascar. *Comptes Rendus. Géoscience*, 354(S2), 7-34
- Thionon, I., Lebas, E. (2023) MD242 / MAYOBS25 cruise, RV Marion Dufresne, <https://doi.org/10.17600/18003404>
- Thordarson, Th, Self, S. (1993), The Laki (SkaftarFires) and Grimsvötn eruptions in 1793-1795. *Bull Volcanol.*, 55 :233-263
- Traineau et al., (2006), Etat des connaissances du potentiel géothermique de Mayotte, BRGM/RP-54700-FR, 81 p., 31 ill., 2 ann.
- Vozoff, K. (1972). The magnetotelluric method in the exploration of sedimentary basins. *Geophysics*, 37(1), 98-141.
- Zinke, J., Reijmer, J.J.G., Dullo, W.-Ch., Thomassin, B.A. (2000), Paleoenvironmental changes in the lagoon of Mayotte associated with the Holocene transgression. *GeoLines* 11, Prague, pp.150-153
- Zinke et al. (2003), Postglacial flooding history of Mayotte Lagoon (Comoro Archipelago, southwest Indian Ocean). *Marine Geology*, 194(3–4), 181–196. [https://doi.org/10.1016/S0025-3227\(02\)00705-3](https://doi.org/10.1016/S0025-3227(02)00705-3)
- Zinke et al. (2005), Facies and faunal assemblage changes in response to the Holocene transgression in the Holocene transgression in the Lagoon of Mayotte (Comoro Archipelago, SW Indian Ocean). *Facies* 50 :391–408 DOI 10.1007/s10347-004-0040-7



Informations

Pour en savoir plus sur l'activité sismo-volcanique à Mayotte, retrouvez les dernières informations sur :

- le site de l'IPGP dédié : www.ipgp.fr/revosima
- Le BRGM - Direction Risques et Prévention, en particulier l'Unité Risques sismique et volcanique
- Le BRGM - Direction des Actions Territoriales, en particulier la Direction régionale de Mayotte
- Le site du BRGM : <https://www.brgm.fr/fr/implantation-regionale/mayotte>
- Contacter le BRGM : <http://www.brgm.fr/content/contact>
- le site de l'IFREMER : <https://wwz.ifremer.fr/Espace-Presse/Communiques-de-presse/Seismes-a-Mayotte-conclusions-de-la-seconde-campagne-oceanographique>
- le site de l'ENS : <http://volcano.itterre.fr/mayotte-seismo-volcanic-crisis>
- le site du bureau central sismologique français (BCSF-RENASS) : www.franceseisme.fr/
- le site du Réseau national de surveillance sismologique RENASS : <https://renass.unistra.fr/fr/zones/>
- le site de GEOSCOPE : <http://geoscope.ipgp.fr/index.php/fr/actualites/actualites-des-seismes>
- le site du NEIC / USGS : <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes>
- la page Mayotte dans le site du Global Volcanism Program, Smithsonian Institution, base de données mondiale du volcanisme : <https://volcano.si.edu/volcano.cfm?vn=233005>
- le site de coordination des observations géodésiques à Mayotte maintenu par l'IGN : <http://mayotte.gnss.fr/>
- le site de la préfecture de Mayotte : <http://www.mayotte.gouv.fr/>

Il est fondamental pour la prévention du risque sismique et la progression des connaissances scientifiques que toute personne souhaitant témoigner, qu'elle ait ou non ressenti un séisme, puisse déposer son témoignage sur le site BCSF-RENASS (Bureau Central Sismologique Français) à l'adresse : www.franceseisme.fr

Les localisations de la sismicité volcanique et tectonique enregistrées par le REVOSIMA en temps réel sont disponibles sur : <https://renass.unistra.fr/fr/zones/mayotte/> et dans le bulletin quotidien du REVOSIMA.

Retrouvez ce bulletin et toute l'actualité du REVOSIMA sur :

- le site web : www.ipgp.fr/revosima
- la page facebook du REVOSIMA : <https://www.facebook.com/ReseauVolcanoSismoMayotte/>

Un bulletin automatique préliminaire d'activité du REVOSIMA, relatif aux activités de la veille et validé par un.e analyste, est publié quotidiennement depuis le 17 mars 2020, et accessible directement sur ce lien : http://volcano.ipgp.fr/mayotte/Bulletin_quotidien/bulletin.html

Ce bulletin est produit par le consortium du REVOSIMA, financé par l'Etat :

Le REVOSIMA (IPGP, BRGM, IFREMER, CNRS) est soutenu par un consortium scientifique avec 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, LMV et l'OPGC, l'Université de Strasbourg, l'Université Grenoble Alpes et l'ISTerre, l'Université de La Rochelle, l'Université de Bretagne Occidentale, l'Université Paul Sabatier, Toulouse et le GET-OMP, GéoAzur, le CNES, Météo France, le SHOM, les TAAF, et collaborateurs. Les astreintes de surveillance renforcée du processus sismo-volcanique par le REVOSIMA ont été assurées pendant une phase provisoire depuis le 25 juillet 2019 sur la base de la mobilisation exceptionnelle de personnels scientifiques permanents disponibles, qui proviennent de laboratoires de l'INSU-CNRS et de leurs universités associées (BCSF-RENASS, CNRS, ITES et Université de Strasbourg, Université Grenoble Alpes et l'ISTerre, Université Paul Sabatier, Toulouse et GET-OMP, Université Clermont Auvergne, LMV 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. Depuis début 2020, les astreintes sont assurées par l'OVPF-IPGP.

Les informations de ce document ne peuvent être utilisées sans y faire explicitement référence.