



Bulletin mensuel

Institut de physique du globe de Paris

Réseau de surveillance volcanologique et sismologique de Mayotte - REVOSIMA

ISSN 2680 – 1205

Octobre 2022

Bulletin de l'activité sismo-volcanique à Mayotte

Évolution au cours du dernier mois

- Entre le 1^{er} et le 31 octobre 2022, 253 séismes Volcano-Tectoniques (VT ; séismes dont la gamme de fréquence est la plus large, de 2Hz à 40Hz), 44 séismes Longue Période (LP ; basse fréquence, entre 0,5 et 5 Hz) et 3 séismes 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, les déformations sont devenues négligeables.

Les déplacements de surface enregistrés entre le 1^{er} juillet 2018 et fin 2020 par les stations GPS de Mayotte ont montré :

- a) un déplacement d'ensemble des stations GPS de Mayotte vers l'est d'env. 21 à 25 cm ;
- b) un affaissement (subsidence) d'env. 10 à 19 cm selon leur localisation sur l'île.

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.

Édifice principal : latitude : -12°54' ; longitude : 45°43' ; hauteur : au moins 800 m (en date d'octobre 2021) ; profondeur à la base du site éruptif : -3500 m

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

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 - Octobre 2022

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 opère le REVOSIMA à travers l'Observatoire volcanologique du Piton de la Fournaise, en coresponsabilité avec le BRGM et sa direction régionale à Mayotte et en étroite association avec l'IFREMER et le CNRS. Le REVOSIMA est soutenu par un consortium scientifique 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 est désormais publié 1 fois par mois et 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 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. Du 1^{er} au 31 octobre 2022, 253 séismes Volcano-Tectoniques (VT), 44 séismes Longue Période (LP) et 3 séismes 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 depuis le 1^{er} juillet 2018 par les stations GPS de Mayotte indiquent : 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 sans équivoque.** 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*).

4. Du 02 au 18 mai 2019, une campagne océanographique (MD220-MAYOBS1) 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) 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, 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 (CH_4) dissous, dioxyde de carbone (CO_2), dihydrogène (H_2), et des anomalies marquées en turbidité et Manganèse Total Dissolvable (TdMn). Lors des campagnes de surveillance MAYOBS18 (du 09 au 13 avril 2021) et MAYOBS19 (du 27 mai au 01 juin 2021), aucune évolution morphologique majeure n'a été mise en évidence dans la zone des coulées au nord-ouest du nouveau volcan. **Lors des deux dernières campagnes, MAYOBS21 (13 septembre au 4 octobre 2021) et MAYOBS23 (9 au 22 juillet 2022), à nouveau, la présence de nouvelle coulée de lave n'a pas pu être mise en évidence.**

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 essai principal ; 5-15 km à l'Est de Petite-Terre), est une structure préexistante à l'éruption sous-marine en cours, 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, 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 sont désormais identifiés dans la zone du Fer à Cheval en date du 22/07/2022, avec 4 sites actifs en dehors, deux au nord-ouest, un à l'est et un au Sud du Fer à Cheval.** 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 A_0 et B_0 depuis mai 2019, site C_0 depuis août 2019, sites D_0 et E_0 depuis mai 2020, sites C_1 et F_0 actifs depuis octobre 2020 en simultané à une expansion vers le nord-ouest des sites A_0 et B_0 (observation des nouveaux sites B_1 , A_1 et A_2), sites G_0 , D_1 , C_2+C_3 et C_4 entre janvier et mai 2021, site H_0 observé le 10 juillet 2021. Le site actif I_0 a été observé le 20 septembre 2021 lors de la couverture acoustique de surveillance du Fer à Cheval pendant la campagne MAYOBS21. **Un nouveau site, J_0 , situé au sud à l'extérieur du Fer à Cheval a été identifié au cours de la campagne MD239-MAYOBS23 en date du 10 juillet 2022.** Les sites E_0 , H_0 , et I_0 sont localisés à l'extérieur du Fer à Cheval : E_0 sur la chaîne volcanique à l'est, H_0 au nord-ouest, et I_0 au Nord du Fer à Cheval. Les autres sites sont répartis sur les flancs intérieurs ouest, sud et est de la structure du Fer à Cheval. **Le nombre de sites actifs est en augmentation passant de 2 observés en mai 2019 à 22 en juillet 2022. Les analyses détaillées des données d'acoustique de colonne d'eau de la campagne MAYOBS23 sont en cours.** Les signatures géochimiques sont également très marquées mais suggèrent des sources ou des processus différents de ceux de la zone du nouveau volcan.

Les panaches acoustiques et géochimiques restent fortement actifs dans la zone du Fer à Cheval avec une augmentation en nombre et en extension des sites actifs d'émission depuis mai 2019. **Les fluides émis en fond de mer et collectés lors de la campagne GEOFLAMME sont composés majoritairement de dioxyde de carbone CO_2 ($99,0 \pm 0,3 \%$ vol), avec une faible contribution de méthane CH_4 ($0,8 \pm 0,2 \%$ vol) et de dihydrogène H_2 (10 à 1000 ppm vol).** La signature isotopique du carbone stable (^{13}C) montre que le CO_2 est d'origine mantellique et suggère que le CH_4 est quant à lui d'origine abiotique, 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 ($^3\text{He}/^4\text{He}$) 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.

Les mesures des propriétés physico-chimiques de la colonne d'eau entre 0 et 1000 m de profondeur sont suivies depuis le 17 septembre 2021 par un planeur autonome sous-marin (également appelé glider). **Entre le 1^{er} et le 31 octobre 2022, le planeur a effectué 29 jours en mer, réalisant 76 traversées, équivalent à 714 profils verticaux entre 900 et 1000 m. Au total, 55 traversées sur 76 montrent des anomalies en gaz dissous, 34 dans la zone du Fer à Cheval et 21 dans la zone du site actif J au sud de la zone du Fer à Cheval. Sur la période considérée, 7 anomalies importantes (supérieures à 25 UR (Unité relative) en CH_4 et 5 UR en CO_2 dissous) ont été mesurées au niveau de la zone du Fer à cheval, toutes ayant eu lieu lors des deux dernières semaines. Sur la période d'analyse, les sites A, B et C ont montré les valeurs de concentration relative les plus élevées. Les valeurs maximales mesurées sur le dernier mois atteignent 50.6 UR pour le CH_4 et 10.6 UR pour le CO_2 .**

Durant les deux dernières semaines, des valeurs d'anomalies de gaz dissous en hausse ont été enregistrées, atteignant des niveaux comparables à ceux de septembre/octobre 2021. Cette hausse est généralisée sur la zone du Fer à Cheval ainsi que dans la zone sud-ouest et la zone du site J0.



14 anomalies en indice de rétrodiffusion acoustique (BI), faisant référence à la détection de bulles et/ou gouttelettes, ont été détectées à proximité des sites A, B, et C. Ramené à des valeurs moyennes hebdomadaires on note, entre le 1er et le 31 octobre 2022, une moyenne de 3.5 passages au niveau de panaches acoustiques par semaine, ce qui est proche de la valeur moyenne observée depuis le 17 septembre 2021.

6. En l'état actuel des connaissances, l'éruption a produit un volume estimé d'environ 6,55 km³ 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 172-181 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 77 m³/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-ouest 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 (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.

Lors des deux dernières campagnes, MAYOBS21 (13 septembre au 4 octobre 2021) et MAYOBS23 (9 au 22 juillet 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 CO₂) 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 CO₂ 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 CO₂ par le sol (et de leur composition isotopique) est mesurée.** La composition chimique des gaz hydrothermaux riches en CO₂ (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).

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). 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, MAYOBS21, MAYOBS23 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). 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.

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

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). Ces analyses sont faites par les scientifiques du REVOSIMA lors des pickathons après chaque relève d'OBS, tous les 4 à 6 mois environ à l'heure actuelle (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., 2022). 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'à présent. Pour cette raison, la figure 1 a été séparée en deux figures : 1a pour la sismicité VT, 1b pour la sismicité LP. 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 31 octobre 2022, le Réseau de surveillance Volcanologique et Sismologique de Mayotte (REVOSIMA) a détecté, avec le réseau de stations terrestres, un total de 253 séismes Volcano-Tectoniques (VT ; séismes dont la gamme de fréquence est la plus large, de 2Hz à 40Hz), 44 séismes Longue Période (LP ; basse fréquence, entre 0,5 et 5 Hz) et 3 séismes 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 1, 2, 3, 4, 5 et 6, et Tableaux 1 et 2).

Après une augmentation de février à avril 2020, la sismicité a diminué progressivement de mai à juillet 2020 et est depuis en lente décroissance, avec quelques fluctuations. Les séismes de plus forte magnitude (énergie), dont le dernier ressenti qui s'est produit le 14 avril 2022 (M4.1), ont lieu majoritairement dans l'essai distal ou entre les deux essais depuis plusieurs mois (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 1a, 2). En revanche, la sismicité basse fréquence (séismes longue-période et très longue-période) est toujours présente dans l'essai proximal (Figure 1b) et est relativement stable.

- Sur le dernier mois, 44 séismes LP ont été enregistrés. La majorité des séismes LP ont lieu lors d'essaims de quelques dizaines de minutes, parfois de manière répétée dans une journée ou sur quelques jours, et sont souvent associés à des signaux VLP. Pour le mois d'octobre 2022, 3 VLP ont été enregistrés.

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, 133 séismes ont pu être localisés manuellement (131 VT et 2 LP ; Figure 1a), dont 29 VT de magnitude M2 à M3 et 3 VT de magnitude M3 à M4. Ces séismes sont majoritairement localisés entre 0 et 30 km à l'est de Petite-Terre (Figures 1, 2, 3, 4, 5 et 6, Tableaux 1 et 2).

Période du : 1 ^{er} au 31 octobre 2022	
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 30 septembre 2022 détectés selon le même protocole)	
Classe de magnitude	Nombre de Séismes
M < 1	35 (28)
M1 à M2	64 (65)
M2 à M3	29 (32)
M3 à M4	3 (0)
M4 à M5	0 (0)
M5 à M6	0 (0)
M1-M6	96 (97)
M >= 2	32 (32)

Tableau 1 : Répartition des séismes volcano-tectoniques (VT) et tectoniques (hors essaims) enregistrés, validés et localisés par le réseau terrestre par classe de magnitude du 1^{er} au 31 octobre 2022.

Total séismes >=3.5	Dont M >= 4.0	Dont M >= 4.5	Dont M >= 5.0	Dont M >= 5.5
2059	568	153	36	2

Tableau 2 : Comptage des séismes volcano-tectoniques (VT) et tectoniques (hors essaims) localisés de magnitude M>3,5 du 10 mai 2018 au 31 octobre 2022 par classe de magnitude (base de données BRGM et REVOSIMA).



- **Ramené à des valeurs moyennes quotidiennes on note, entre le 1^{er} et le 31 octobre 2022, une moyenne de 4 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 (Figures 1, 2) 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 5,0, voire plus, sont toujours possibles comme le montre celui du 10 novembre 2020.
- 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 (**Figure 3**). Le traitement des données OBS 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 31 octobre 2022 par rapport au bulletin précédent (voir Figures 1 et 2).

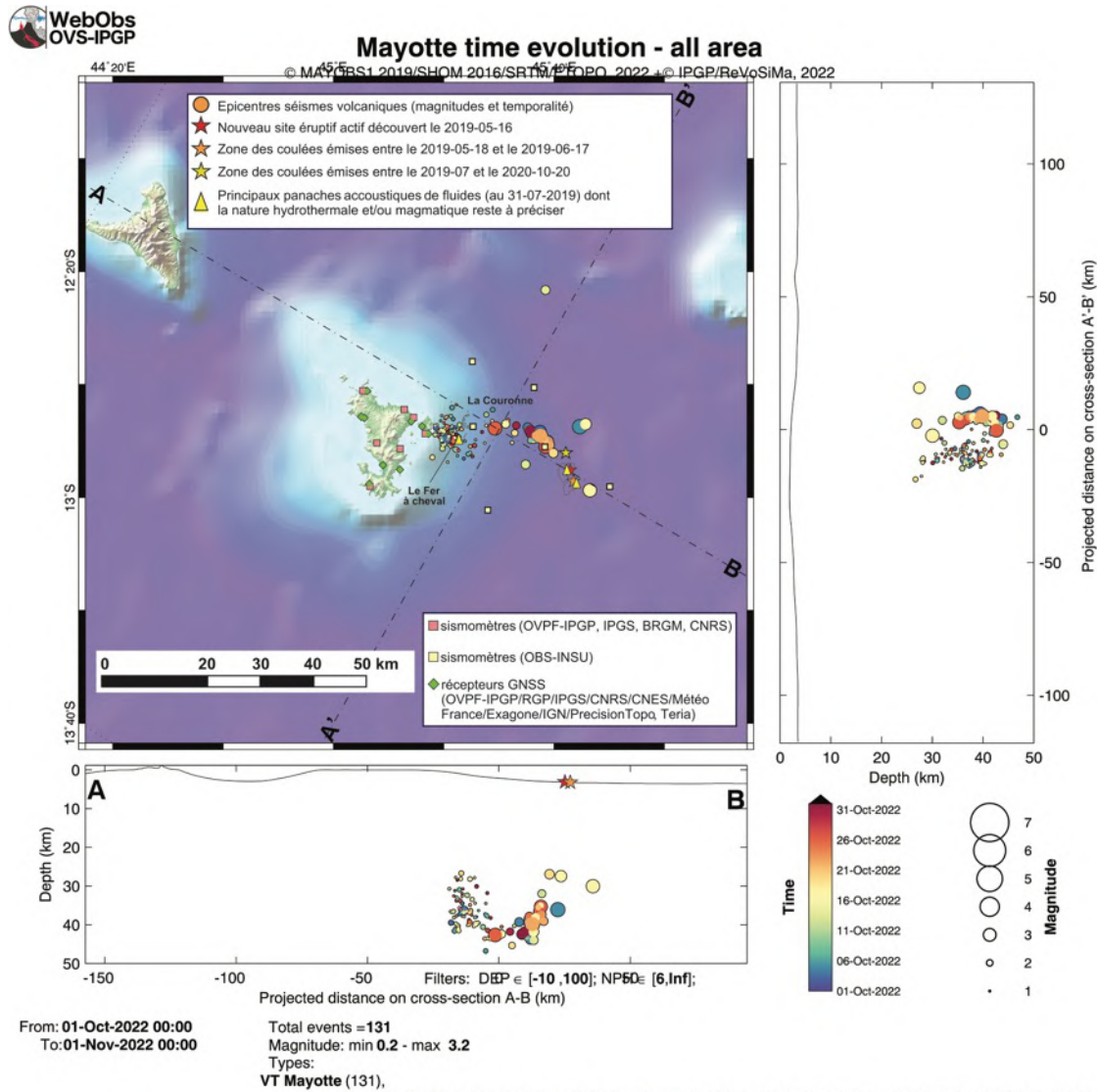


Figure 1a : Carte des épicentres (± 5 km) des séismes volcano-tectoniques (VT) localisés avec les réseaux sismiques à terre (IPGP-CNRS-BRGM-BCSF-RENASS, ITES) entre le 1^{er} et 31 octobre 2022 (échelle temporelle de couleur). Sont aussi représentées une projection des hypocentres des séismes le long 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) 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 sismologiques du réseau terrestre, les sismomètres fond de mer (OBS) et les stations de positionnement par satellite GPS sont indiquées par des symboles (voir légende). (©OVPF-IPGP, BRGM, IFREMER, CNRS, BCSF-RENASS, ITES / REVOSIMA).

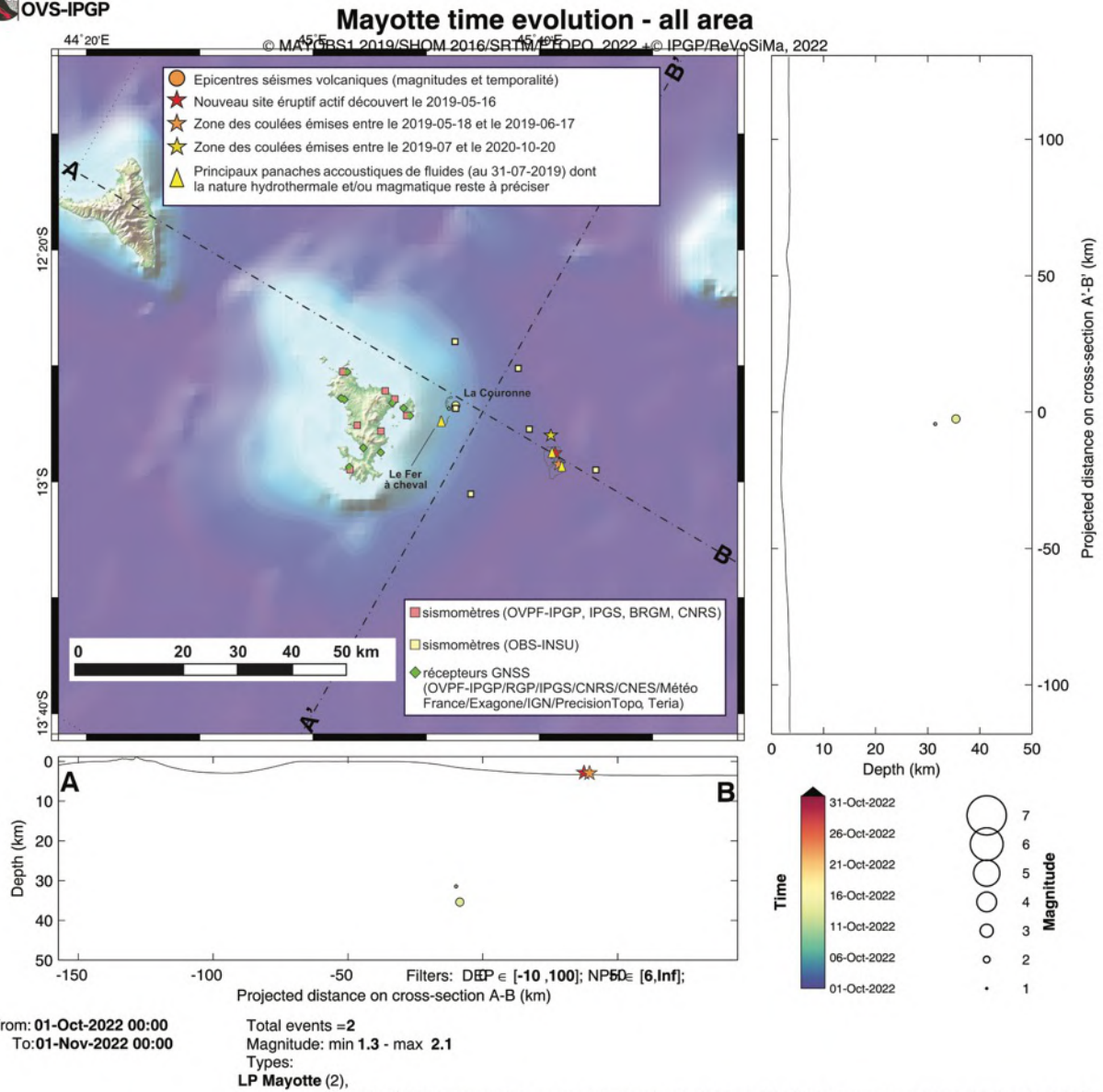
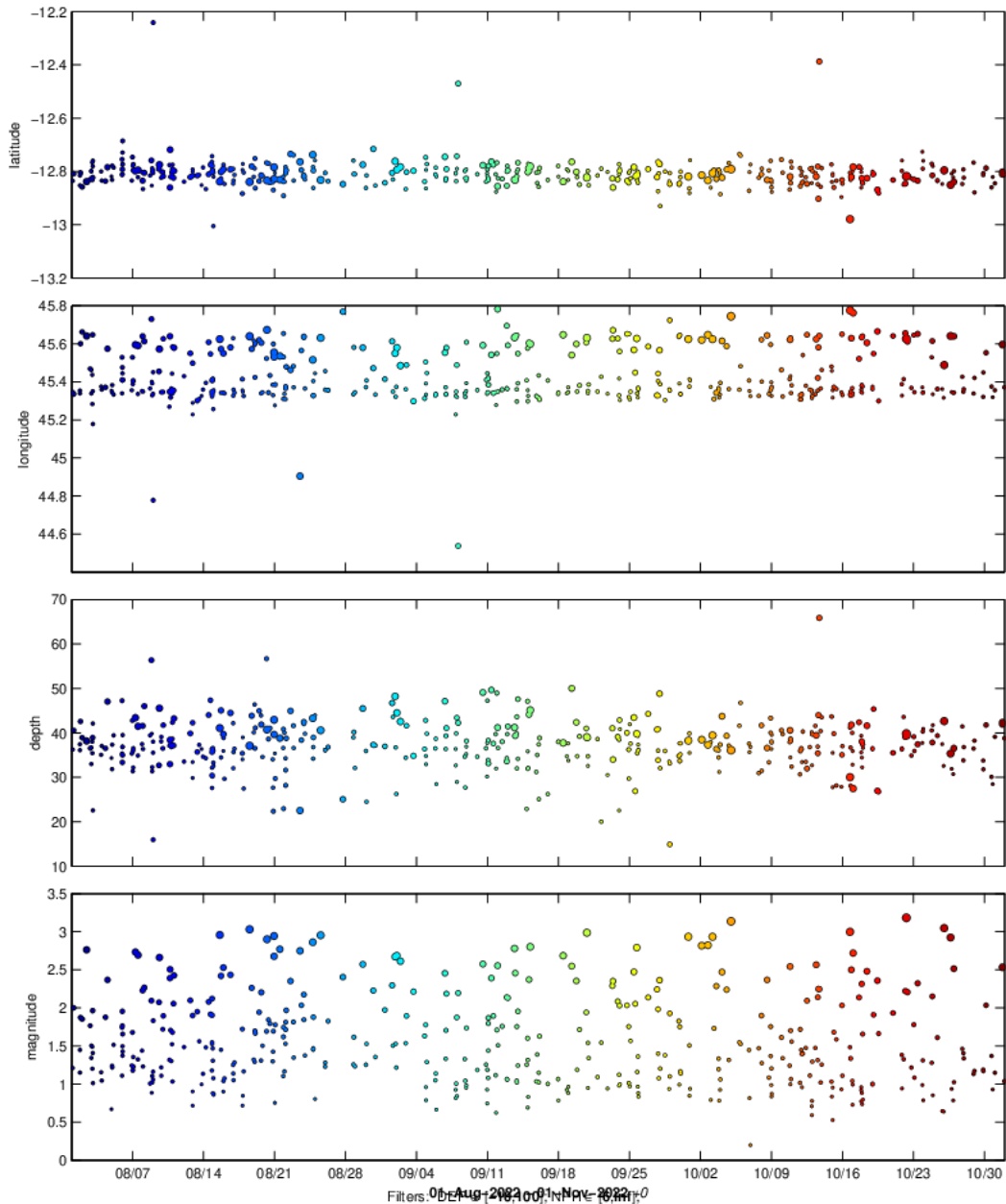


Figure 1b : Carte des épicentres (± 5 km) des séismes longue période (LP) localisés avec les réseaux sismiques à terre (IPGP -CNRS-BRGM-BCSF-RENAISS, ITES) entre le 1^{er} et 31 octobre 2022 (échelle temporelle de couleur). Sont aussi représentées une projection des hypocentres des séismes le long de coupes transverses et axiales le long de la ride montrant la localisation estimée en profondeur (la précision varie entre ± 5 km et ± 15 km) des séismes en fonction de la magnitude (taille des symboles et de la date (échelle temporelle de couleur)). La localisation approximative des panaches acoustiques identifiés pendant les campagnes océanographiques (MD220-MAYOBS1, MD221-MAYOBS2, MD222-MAYOBS3, MD223-MAYOBS4, MAYOBS15, MAYOBS17) 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, les sismomètres fond de mer (OBS) et les stations de positionnement par satellite GPS sont indiquées par des symboles (voir légende). (©OVPF-IPGP, BRGM, IFREMER, CNRS, BCSF-RENAISS, ITES / REVOSIMA).



Mayotte time evolution – all area

© MAYOBS1 2019/SHOM 2016/SRTM/ETOPO, 2022 +© IPGP/ReVoSiMa, 2022



From: 01-Aug-2022 00:00
To: 01-Nov-2022 00:00

Total events = 431
Magnitude: min 0.2 – max 3.2
Types:
(1),

LP Mayotte (27),
Regional (1),
VT Mayotte (402),

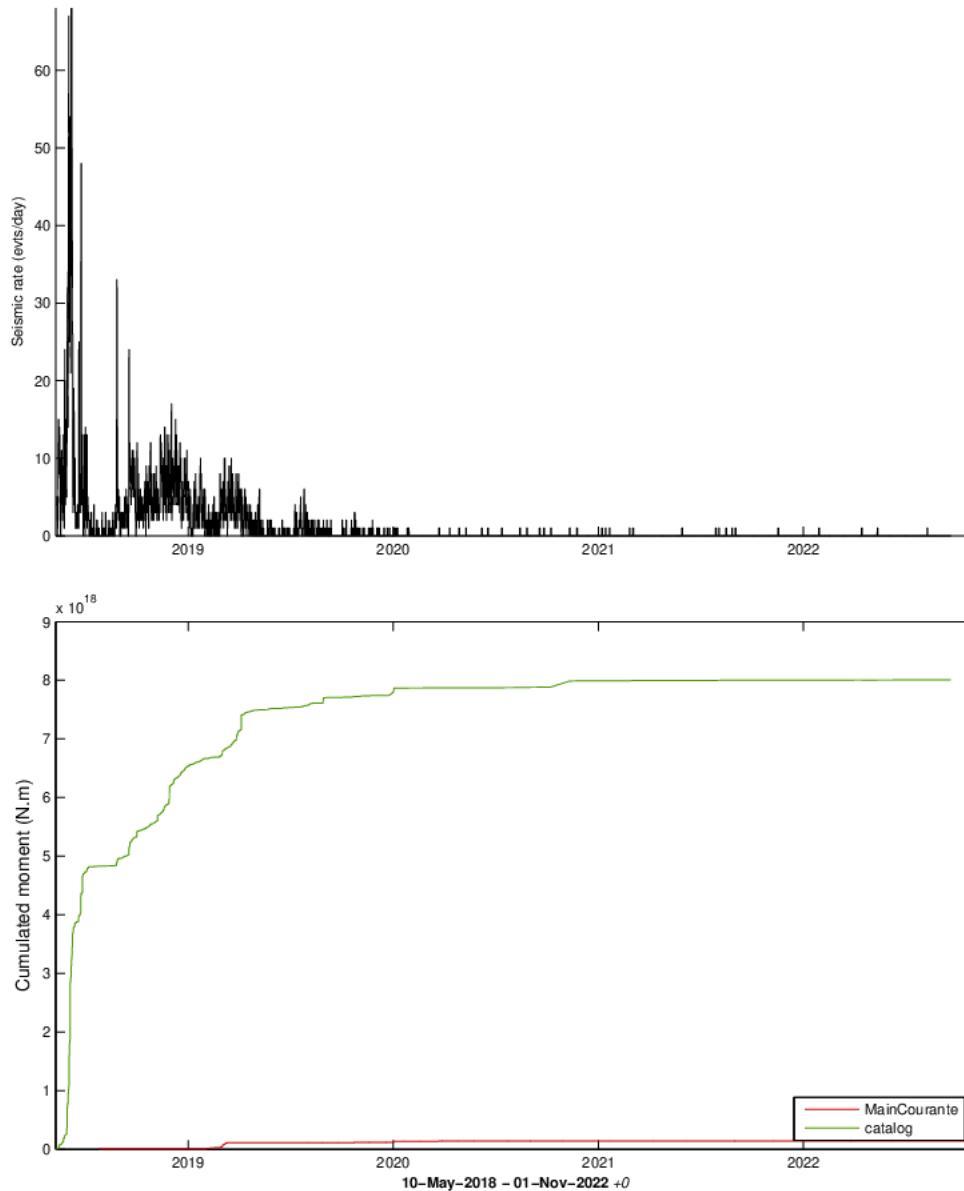
PROC.HYPOMAYOTTE / MayotteTime_time_ - sysop@pito.ndsc.afumets - 03-Nov-2022 11:55:43 +0 - hypomap.m (2021-05-19) / WebObs MMXXII

Figure 2 : 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-RENAISS, ITES) entre le 1^{er} août 2022 et le 31 octobre 2022 (3 mois). Se référer à la Figure 1 pour l'échelle des magnitudes (taille des symboles). (© OVPF- IPGP, BRGM, IFREMER, CNRS, BCSF-RENAISS, ITES / REVOSIMA).



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

© IPGP, 2022 + © ReVoSiMa, 2022



Instantaneous seismic rate (144.0/day samples) calculated on a moving, 24h fixed-size, time window
Last event: 03-Nov-2022 00:01:39 +0

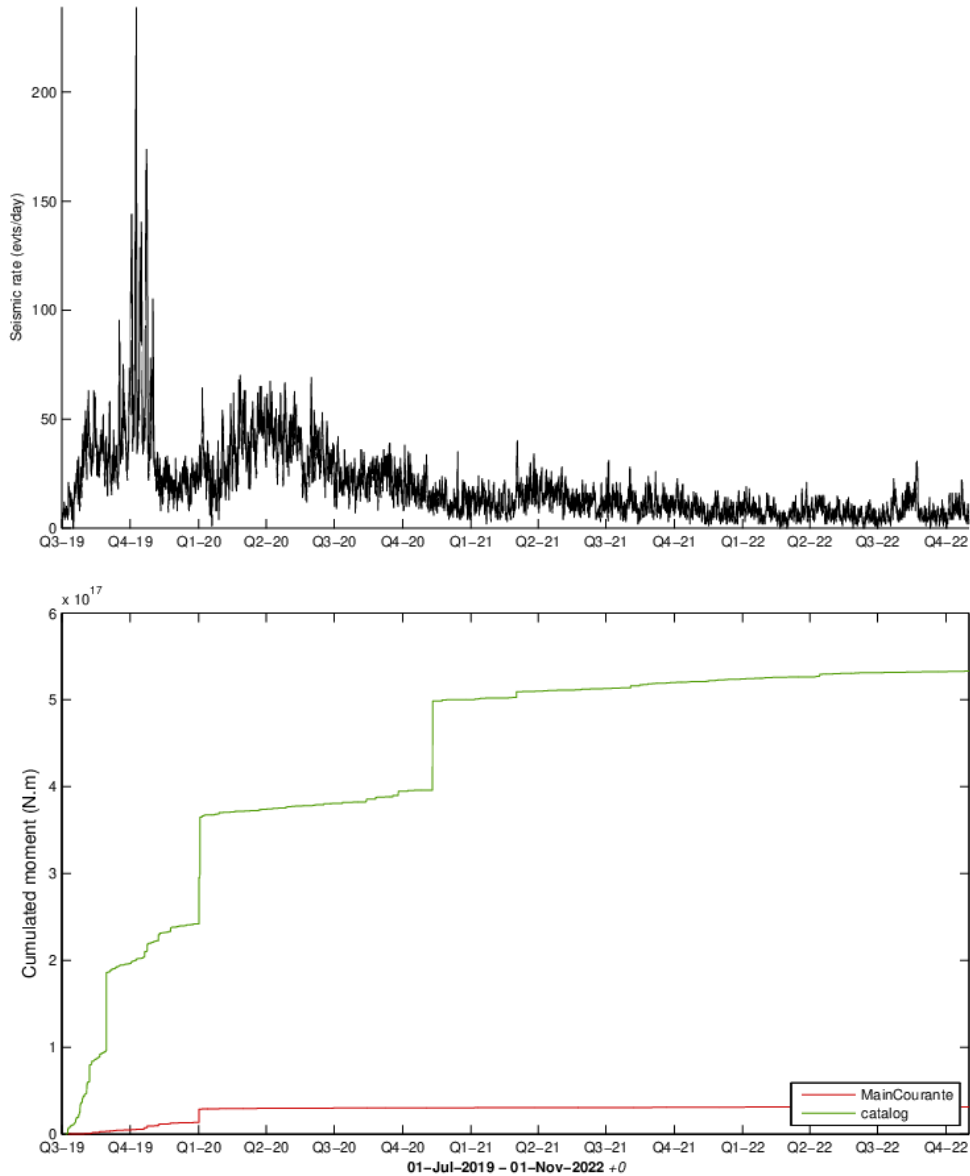
PROC.MCSTATSMAYOTTE_BIGMAG / mc3mayotte_ - sysop@pitondescalumets - 03-Nov-2022 10:58:55 +0 - mc3stats.m (2021-01-01) / WebObs MMXXII

Figure 3 : 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).



Stats sismicité – M>0 REVOSIMA – Seismic rate and swarms

© IPGP, 2022 + © ReVoSiMa, 2022



Instantaneous seismic rate (144.0/day samples) calculated on a moving, 24h fixed-size, time window
Last event: **03-Nov-2022 00:01:39 +0**

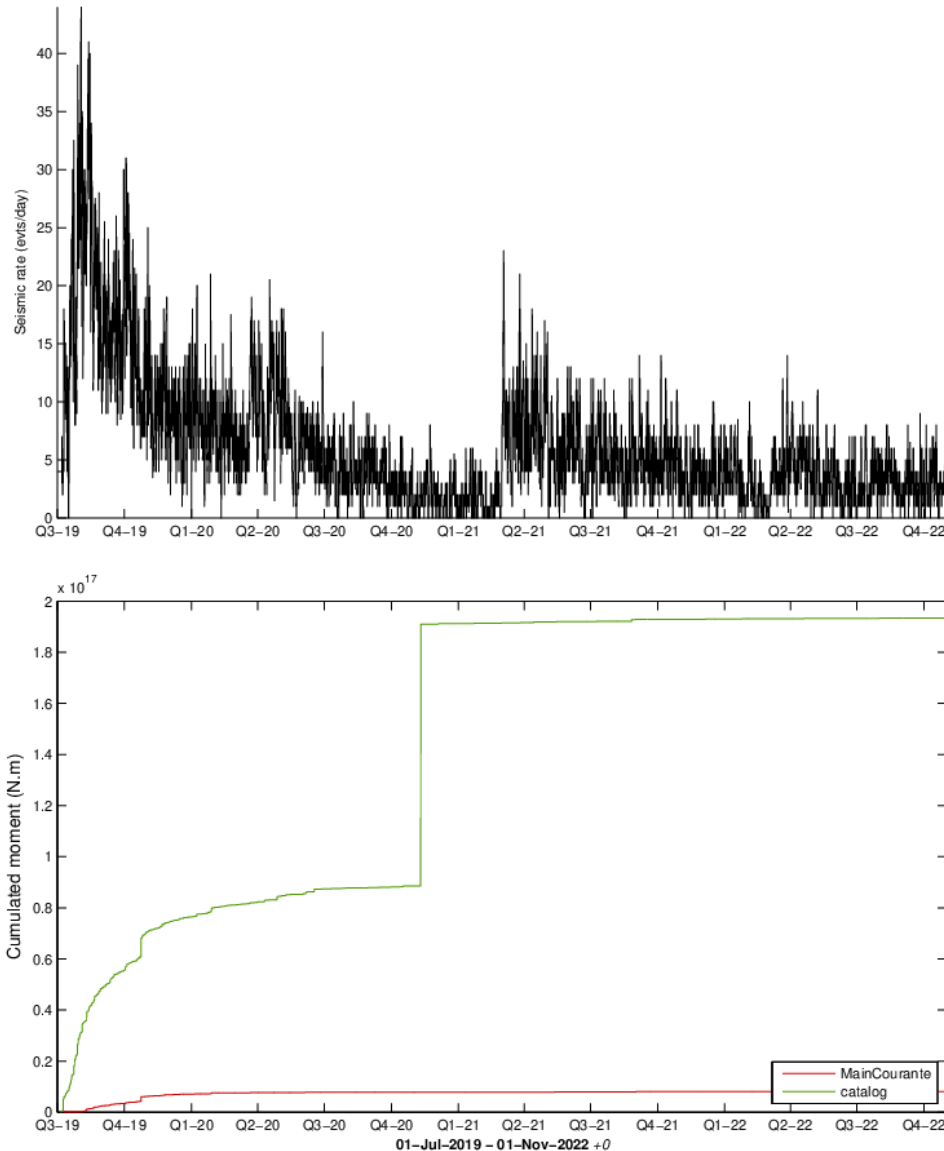
PROC.MCSTATSMAYOTTE / mc3mayotte_ - sysop@pilondeescalumets - 03-Nov-2022 10:30:01 +0 - mc3stats.m (2021-01-01) / WebObs MXXXII

Figure 4 : En haut : Évolution temporelle du taux instantané de la sismicité volcano-tectonique (VT ; $M > 0$) calculé sur une fenêtre de 24h glissante toutes les 10 minutes entre le 1^{er} juillet 2019 (mise en place du REVOSIMA) et le 31 octobre 2022. 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. Les augmentations du taux de sismicité en octobre et novembre 2019 sont liées au dépouillement des données continues des OBS lors du pickathon virtuel et à l'identification de nombreux petits VT non visibles sur les données à terre (© OVPF-IPGP et REVOSIMA).



Stats sismicité – essaim proximal REVOSIMA – Seismic rate and swarms

© IPGP, 2022 + © ReVoSiMa, 2022



Instantaneous seismic rate (144.0/day samples) calculated on a moving, 24h fixed-size, time window

Last event: 03-Nov-2022 00:01:39 +0

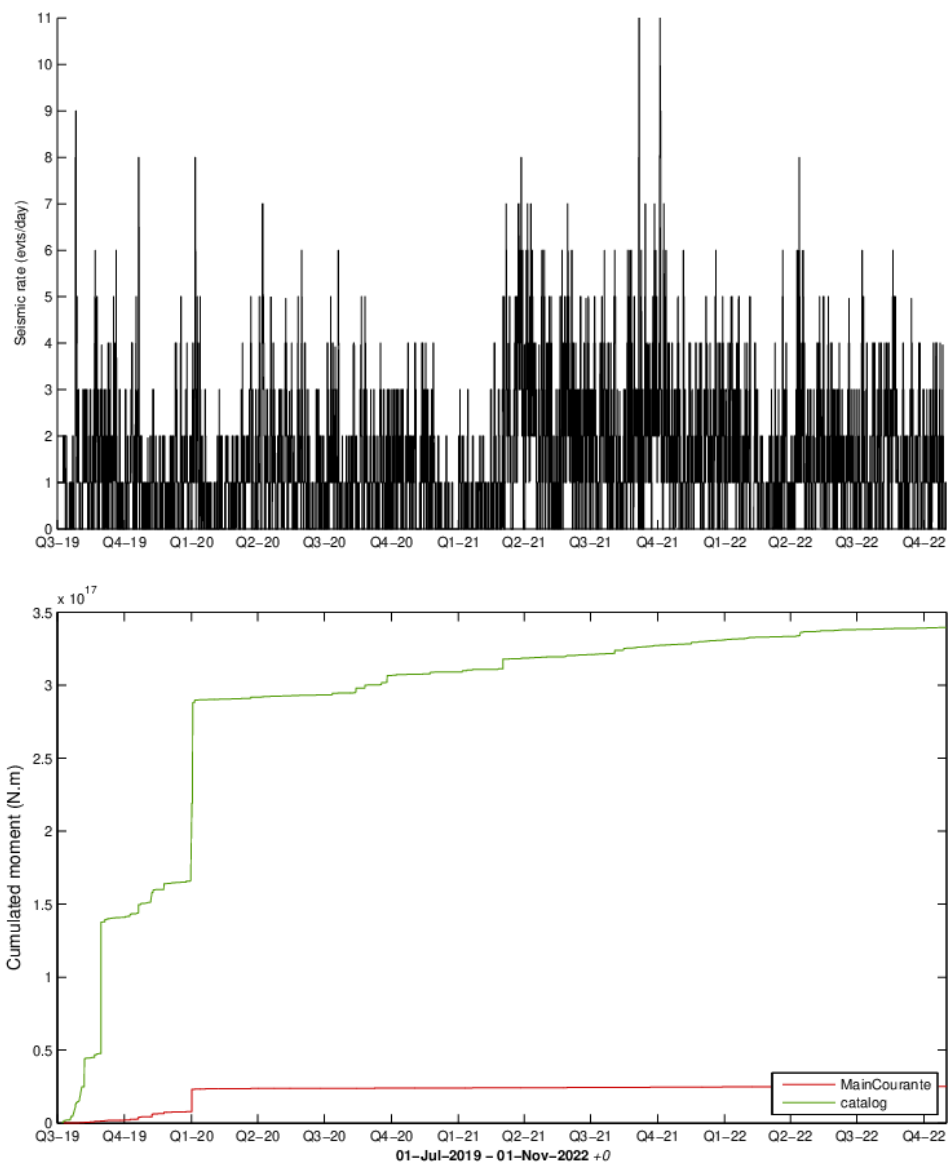
PROC.MCSTATSMAYOTTE_MAIN / mc3mayotte - syoop@pitondescalumets - 03-Nov-2022 10:44:14 +0 - mc3stats.m (2021-01-01) / WebObs MXXXII

Figure 5 : En haut : Évolution temporelle du taux instantané de la sismicité volcano-tectonique (VT ; $M > 0$) calculé sur une fenêtre de 24h glissante toutes les 10 minutes entre le 1^{er} juillet 2019 (mise en place du REVOSIMA) et le 31 octobre 2022 et pour la zone de l'essaim proximal uniquement. Sur ce graphique ne sont pris en compte que les séismes localisés. 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 et pour la zone de l'essaim proximal uniquement. 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. A partir du 1^{er} mars 2021, un changement de méthode des algorithmes de détection automatique a entraîné une augmentation du nombre de séismes localisés et donc de la statistique (© OVPF-IPGP et REVOSIMA).



Stats sismicité – essaim distal & volcan REVOSIMA – Seismic rate and swarms

© IPGP, 2022 + © ReVoSiMa, 2022



Instantaneous seismic rate (144.0/day samples) calculated on a moving, 24h fixed-size, time window
Last event: 03-Nov-2022 00:01:39 +0

PROC.MCSTATSMAYOTTE_SECONDARY / mc3mayotte_ - sysop@pitondescalumets - 03-Nov-2022 10:41:26 +0 - mc3stats.m (2021-01-01) / WebObs MMXXII

Figure 6 : En haut : Évolution temporelle du taux instantané de la sismicité volcano-tectonique (VT ; $M > 0$) calculé sur une fenêtre de 24h glissante toutes les 10 minutes entre le 1^{er} juillet 2019 (mise en place du REVOSIMA) et le 31 octobre 2022 et pour la zone de l'essaim distal uniquement. Sur ce graphique ne sont pris en compte que les séismes localisés. 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 et pour la zone de l'essaim distal uniquement. 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. A partir du 1er mars 2021, un changement de méthode des algorithmes de détection automatique a entraîné une augmentation du nombre de séismes localisés et donc de la statistique (© OVPF-IPGP et REVOSIMA).



Déformation

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 depuis le mois de juillet 2018 (Lemoine et al., 2020 ; Feuillet et al., 2021) un déplacement d'ensemble de l'île vers l'est et un affaissement (Figures 7 et 8). En cumulé depuis le 1^{er} juillet 2018 ces déplacements horizontaux sont d'environ 21 à 25 cm vers l'est, et l'affaissement (subsidence) d'environ 10 à 19 cm suivant les sites (Figure 8). A noter que vers avril-mai 2019, un premier ralentissement des déplacements a été observé. Depuis 2020 les déplacements ont de nouveau ralenti et depuis mars 2020 la subsidence est devenue négligeable sur certaines stations GPS (tels que MTSA, MTSB, PORO, Figures 8 et 9). 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 sans équivoque.

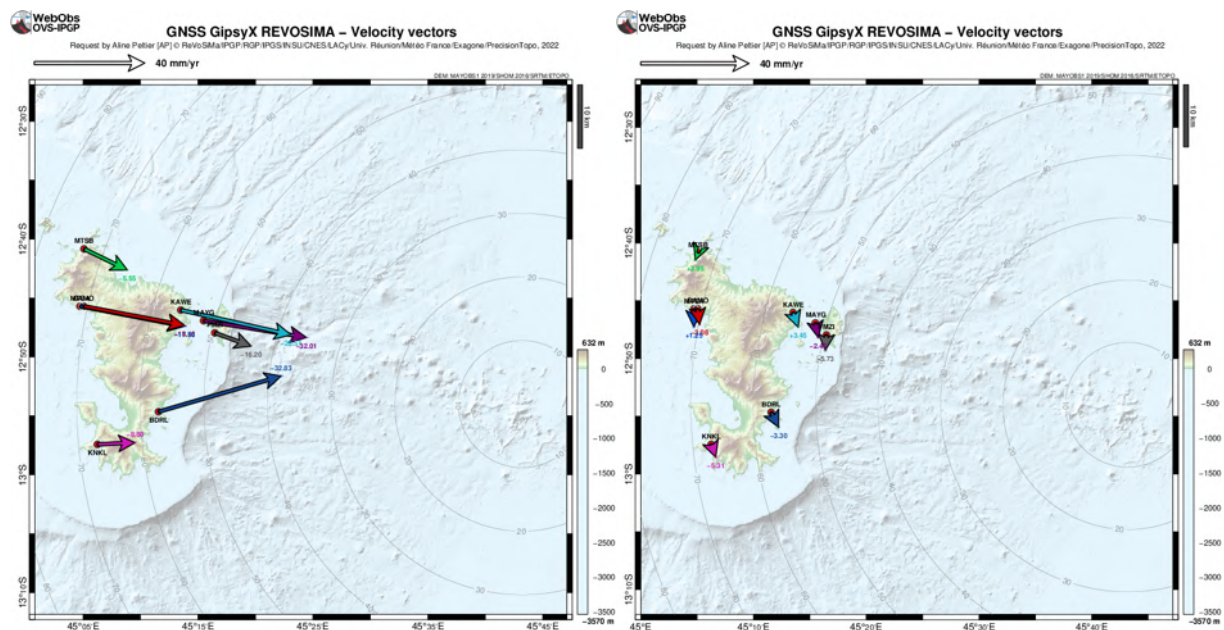


Figure 7 : Déplacements du sol enregistrés sur les stations GPS de Mayotte depuis le 1^{er} juillet 2018 (à gauche) et sur les derniers douze mois (à droite). Les déplacements horizontaux sont représentés sous forme vectorielle et les déplacements verticaux sont indiqués par les valeurs chiffrées en couleur. Post-traitement de ces données réalisé par l'IPGP (©OVFP-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). 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.

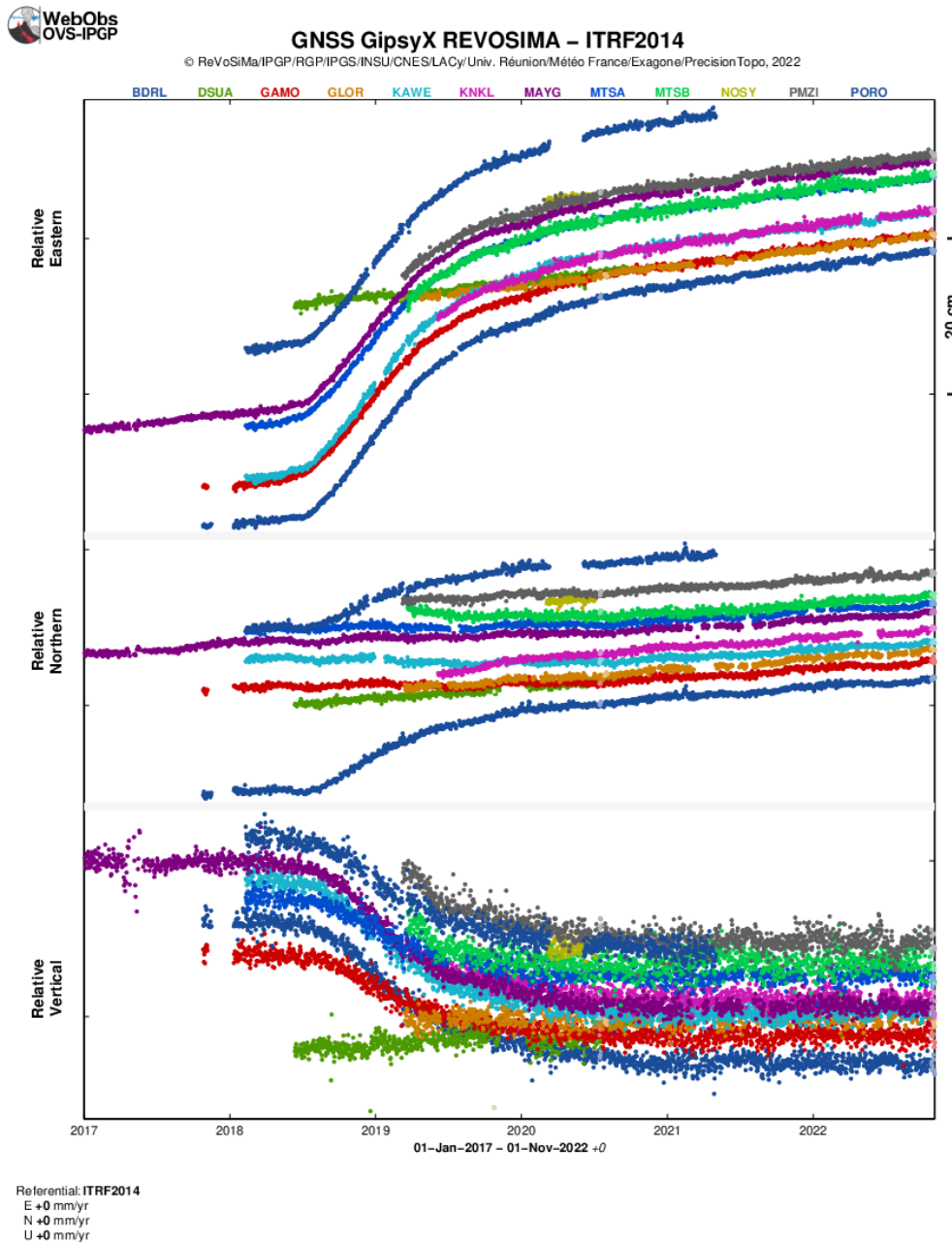


Figure 8 : Déplacements (en cm) enregistrés sur 9 stations GPS localisés à Mayotte (BDRL, GAMO, KAWE, KNKL, MAYG, MTSB, PMZI, PORO), 1 station à Grande Glorieuse (GLOR) et 2 stations au nord de Madagascar à Diego Suarez (DSUA) et Nosy Be (NOSY) sur les composantes est (en haut), nord (au milieu) et vertical (en bas) entre le 1^{er} janvier 2017 et le 31 octobre 2022 pour visualiser une longue série temporelle ante crise. Post-traitement de ces données réalisé par l'IPGP (©OVPF-IPGP / REVOSIMA).

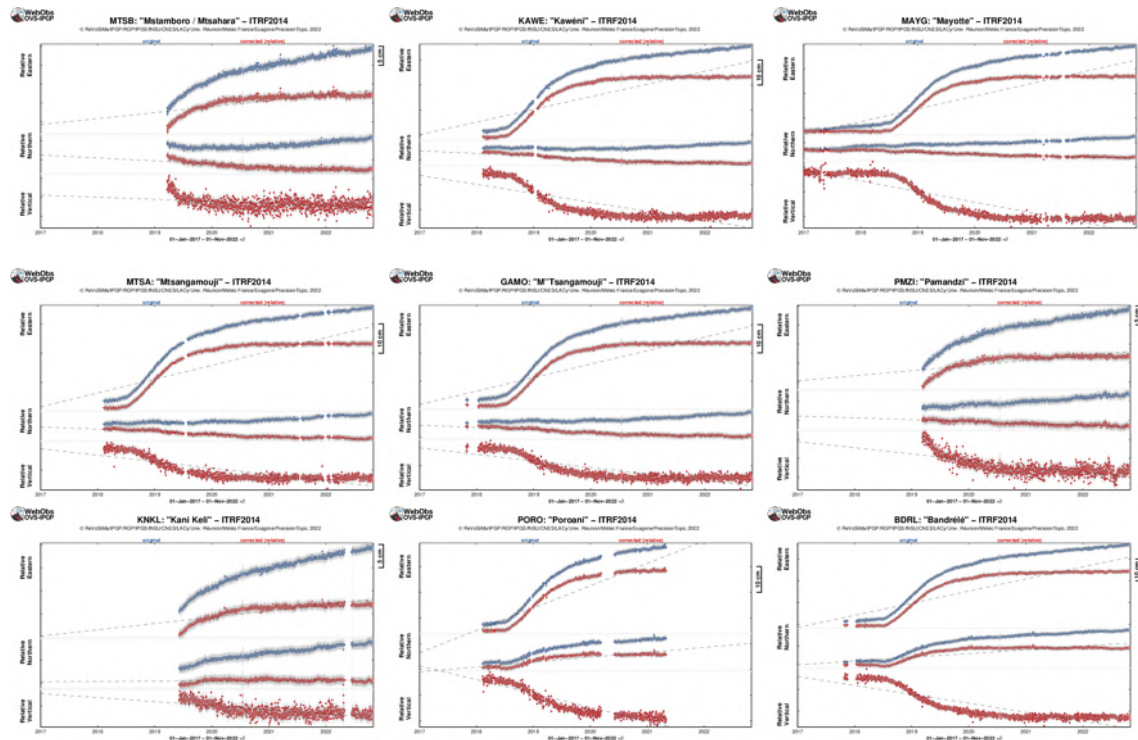


Figure 9 : Déplacements (en cm) enregistrés sur les 9 stations GPS localisés à Mayotte (MTSB, KAWK, MAYG, M TSA, GAMO, PMZI, KNKL, PORO, BDRL) entre le 1^{er} janvier 2017 et 31 octobre 2022 pour visualiser une longue série temporelle ante crise. En bleu les données brutes, en rouge les données corrigées 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 (©OVPF-IPGP / REVOSIMA).

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 10**). 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).

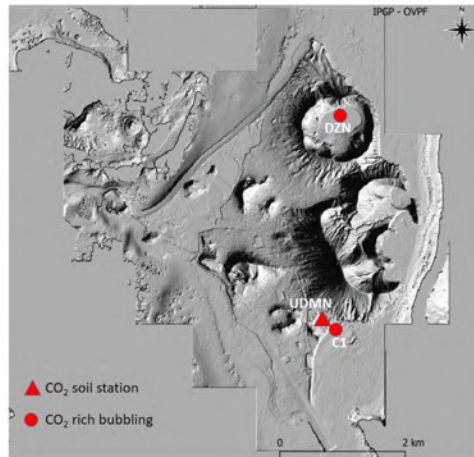


Figure 10 : Sites surveillés du réseau géochimique de Mayotte. Les variations du flux de CO₂ dans le sol sont étroitement liées aux processus magmatiques profonds qui peuvent avoir lieu au niveau du manteau (Liuzzo et al., 2021). La composition chimique et isotopique des bullages de gaz est potentiellement influencée par des processus se produisant dans le système hydrothermal crustal (©OVPF-IPGP / REVOSIMA).

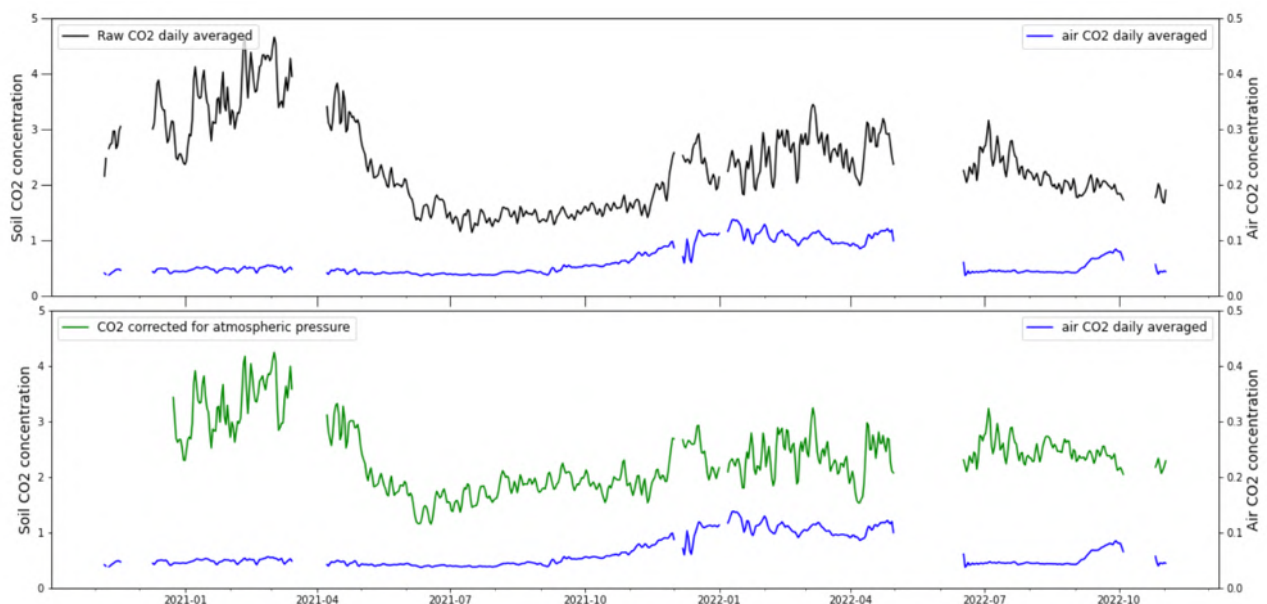


Figure 11 : Concentration en CO₂ dans le sol à la station permanente UDMN. Comparaison entre les données brutes (noir) et les données corrigées de l'influence de la pression atmosphérique (vert). Bleu : concentration dans l'air (1 m au-dessus du sol). Les variations de concentrations dans l'air sont 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 10) et dans le lac Dziani (site DZN, Figure 10) 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 ³He/⁴He ont souvent été observées sur des volcans actifs étroitement liés aux remontées de magma profond (Rizzo et al., 2015, 2016 ; Sano et al., 2015).

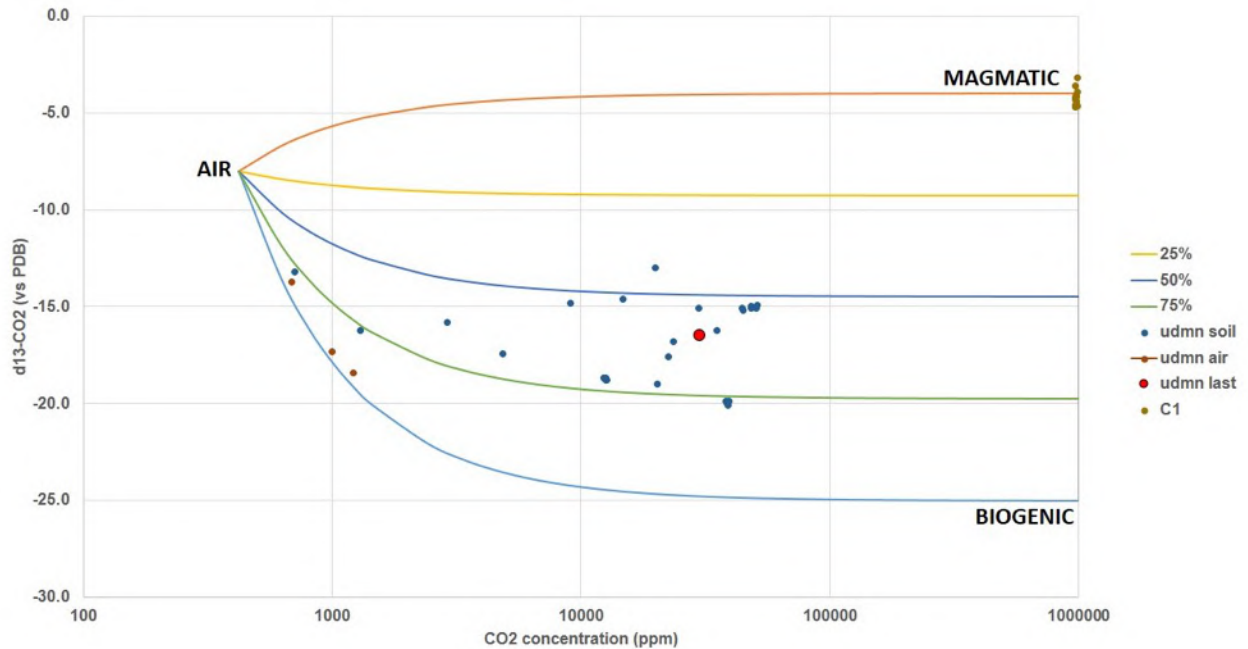


Figure 12 : Variations isotopiques du carbone ($\delta^{13}\text{C-CO}_2$) du CO₂ dans l'air et dans les gaz du sol à la station UDMN. La composition du pôle magmatique est fixée à -4.0 per mil (signature des bullages du site C1 – estran de l'aéroport).

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.

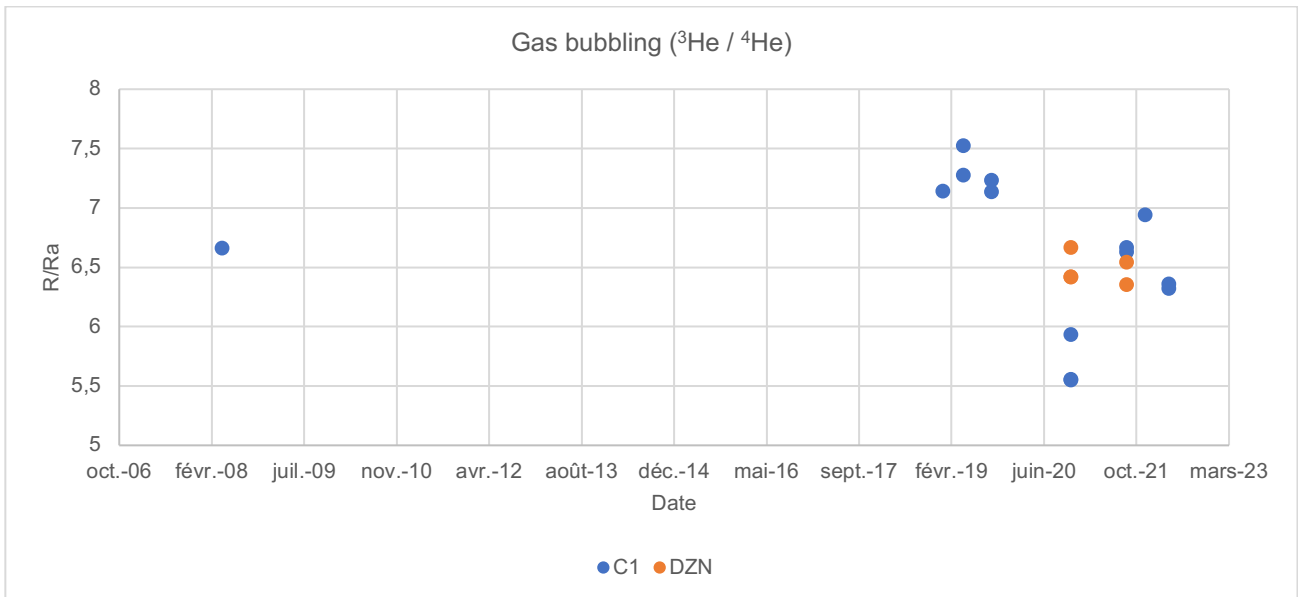


Figure 13 : Analyses isotopiques (gaz rares) des bullages au points de contrôle C1 (estran de l'aéroport) et DZN (Lac Dziani). Une augmentation du R/Ra (rapport isotopique de l'He normalisé à celui de l'atmosphère) est liée à une augmentation de la contribution des fluides profonds remontant du manteau. Erreur moyenne sur chaque analyse : 0.05 unité.

La contribution d'He mantellique a diminué de 86-82% en 2018-2019 à 79-63% 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).

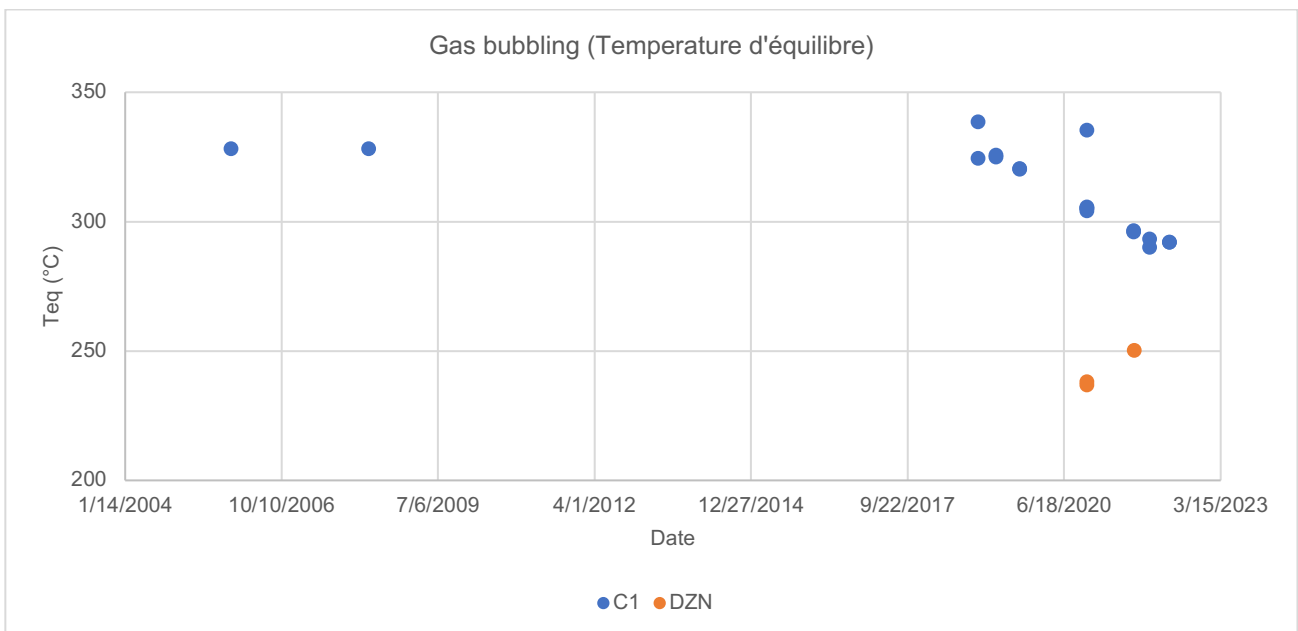


Figure 14 : Température d'équilibre des fluides au sein du système hydrothermal. La température d'équilibre entre le CO_2 et le CH_4 dans le système hydrothermal est estimée à l'aide de l'équation de Giggenbach 1992.

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 l'installation de la station UDMN en novembre 2020, une diminution progressive et ensuite une stabilisation des émissions de CO₂ par le sol (et de leur composition isotopique) est mesurée. L'évolution cyclique annuelle des émissions de CO₂ du sol est principalement contrôlée par l'évolution saisonnière des paramètres environnementaux. La variabilité des concentrations en CO₂ détectées dans l'air est contrôlée par la variabilité de l'apport biogénique.

La composition chimique des gaz hydrothermaux riches en CO₂ (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 par rapport au site de contrôle de l'estran de l'aéroport.

- **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 sont désormais identifiés dans la zone du Fer à Cheval en date du 22/07/2022, avec 4 sites actifs en dehors, deux au nord, un à l'est et un au Sud du Fer à Cheval (Figure 15).** 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 avec 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 lors de la couverture acoustique de surveillance du Fer à Cheval pendant la campagne MAYOBS21. **Un nouveau site, J₀, situé au sud-est à l'extérieur du Fer à Cheval a été identifié au cours de la campagne MD239-MAYOBS23 en date du 10 juillet 2022.** Les sites E₀, H₀, et I₀ sont localisés à l'extérieur du Fer à Cheval : E₀ sur la chaîne volcanique à l'est, H₀ au nord-ouest, et I₀ au Nord du Fer à Cheval. Les autres sites sont répartis sur les flancs intérieurs ouest, sud et est de la structure du Fer à Cheval. **Le nombre de sites actifs est en augmentation passant de 2 observés en mai 2019 à 22 en juillet 2022. L'extension spatiale des sites est aussi en augmentation. Bien qu'il n'y ait pas encore de mesures quantitatives du flux, qualitativement on note une augmentation sur le long terme de l'intensité de l'activité pour les sites les plus importants.**

Les panaches acoustiques et géochimiques restent fortement actifs dans la zone du Fer à Cheval avec une augmentation en nombre et en extension des sites actifs d'émission depuis mai 2019. **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. 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.

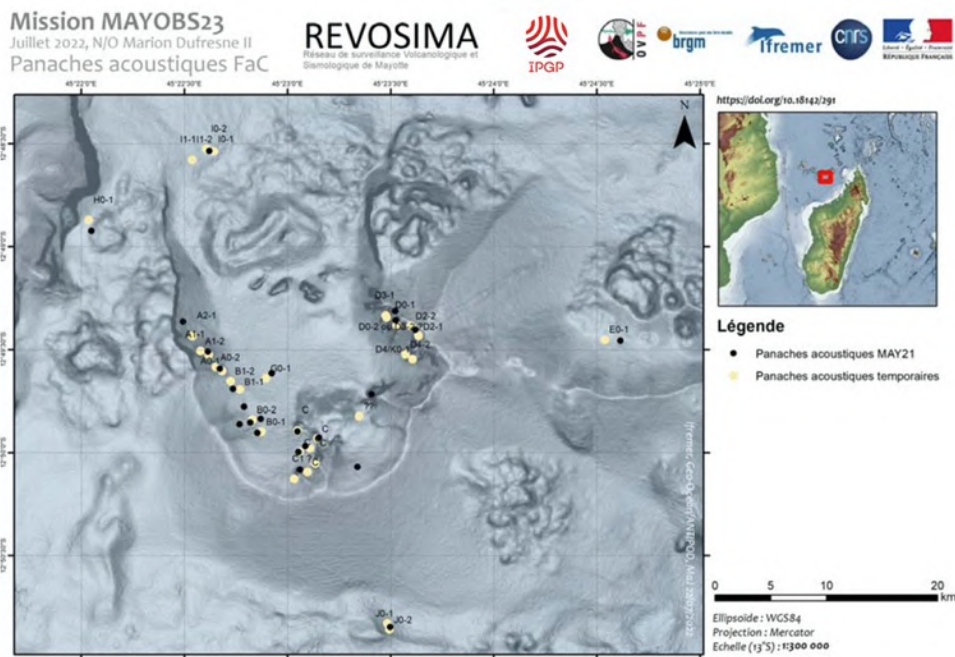


Figure 15 : Localisation des sites de panaches acoustiques identifiés au cours de la campagne MD239-MAYOBS23 et des campagnes de surveillance MAYOBS précédentes et de recherche (SISMAORE, GEOFLAMME, SCRATCH). Un nouveau site «J₀» au sud du Fer à Cheval a été identifié sur la campagne MD239-MAYOBS23 en date du 10 juillet 2022. (©REVOSIMA).

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

En vertu d'un accord-cadre conclu entre l'Ifremer, et la société Alseamar, filiale du groupe Alcen (www.alseamar-alcen.com), un drone sous-marin autonome de type planeur SeaExplorer est mobilisé en mer au large de Mayotte, à 10-15 km des côtes Est. Il est en opération à Mayotte depuis le 17 septembre 2021 dans l'objectif de renforcer le réseau d'observation en mer du REVOSIMA. Entre le 17 septembre 2021 et le 22 avril 2022, le SeaExplorer a été déployé uniquement au-dessus du site du Fer à Cheval. Depuis le 22 avril 2022, l'échantillonnage se fait alternativement entre le site du Fer à Cheval et le site de la Couronne (1 semaine sur 2), couvrant une zone d'environ 150 km².

Le SeaExplorer est entièrement fabriqué en France et est la seule plateforme de ce type de conception européenne. Il se déplace silencieusement dans la colonne d'eau par des changements de flottabilité, utilisant un système de réservoir d'huile externe, alimenté par des batteries rechargeables. Lorsque le réservoir se remplit, le planeur monte le long de la colonne d'eau et l'inverse se produit quand le réservoir est vidangé. Des ailes et un ordinateur de bord permettent au planeur de s'orienter et de suivre une trajectoire prédéfinie qui est connue avec une précision de l'ordre de la centaine de mètres. Le SeaExplorer est piloté à distance via des communications satellite établies avec un centre de contrôle basé à Rousset (Bouches-du-Rhône, France). A chaque fois que le planeur rejoint la surface, un sous-échantillonnage des données est transmis et de nouvelles instructions de navigation peuvent être envoyées pour modifier/adapter la route. Tout le long de la trajectoire, des données physiques, chimiques, biologiques et / ou acoustiques, en fonction des capteurs installés, sont collectées aux moyens de capteurs océanographiques.

Pour le suivi des émissions de fluides magmatique dans la zone de Mayotte la navigation du SeaExplorer a été choisie de façon à optimiser l'acquisition de données en profondeur, là où les signaux sont supposés être les plus marqués. A intervalle de temps régulier (toutes les 8h environ), le planeur plonge à une profondeur de 1000 m (immersion maximale), pendant une durée d'environ 6 h en parcourant une distance d'environ 6 km. Cette phase correspond à une traversée où le planeur navigue en dent de scie pour réaliser des profils verticaux entre 900 et 1000 m, en suivant une direction constante. Pour atteindre cette profondeur et



ensuite rejoindre la surface, le planeur traverse la colonne d'eau, tout en continuant son acquisition. Environ 1 h 30 sont nécessaires au planeur pour monter et descendre à 1000 m, et le temps passé en surface pour la communication ne dépasse généralement pas 20 min.

Le SeaExplorer déployé à Mayotte est équipé de capteurs miniaturisés, permettant de mesurer à haute-résolution spatiale et temporelle, et de façon quasi-continue, les concentrations en gaz dissous (CH_4 , CO_2 , O_2), les propriétés physiques (température, salinité, courant) et acoustique de l'eau. Des algorithmes spécifiques de traitement de données ont été développés par Alseamar, pour la plupart adaptés de méthodes publiées et répondants aux standards internationaux. Les données transmises à chaque remontée en surface sont analysées tous les jours et présentées de façon hebdomadaire aux personnels du REVOSIMA chargés du suivi opérationnel du planeur. A chaque maintenance du planeur (1 journée tous les 15 jours environ), les capteurs sont nettoyés, les batteries rechargées et l'intégralité du jeu de données téléchargé. Une nouvelle analyse plus fine des données est réalisée tous les 3 mois, sur la base du jeu de données complet. Un catalogue exhaustif de l'ensemble des traversées effectuées par le planeur est aussi produit et mis à disposition du REVOSIMA.

Les valeurs des concentrations en CH_4 et CO_2 , enregistrées par le SeaExplorer, sont obtenues à partir des coefficients de calibration d'usine fournis par les fabricants des capteurs (METS – Franatech ; MINI-CO₂ - Pro-oceanus). Elles ne correspondent pas exactement aux valeurs absolues de référence, mais fournissent des mesures qualitatives et relatives des anomalies en gaz dissous et de leur évolution au-dessus de 1000 m. Afin d'éviter toute confusion, ces données sont exprimées en unité relative (UR), homogène à une concentration mais ne traduisant pas directement une grandeur physique. Les anomalies acoustiques sont déduites des mesures du courantomètre acoustique à effet Doppler (capteur ADCP - Nortek) qui équipe le SeaExplorer déployé à Mayotte. Elles sont obtenues en considérant l'intensité du signal d'écho (indice de rétrodiffusion acoustique, nommé BI) renvoyé vers le capteur par les cibles (bulles, gouttes ou gouttelettes, plancton et sédiment), sur une distance verticale d'environ 15 m sous le planeur.

Les mesures effectuées par le SeaExplorer depuis le 17 septembre 2021 ont permis d'identifier et de suivre tous les sites d'émissions de fluide et de panaches acoustiques reconnus par les campagnes MAYOBS du REVOSIMA dans la zone du Fer à Cheval (voir Figure 15). **Les résultats indiquent que depuis la campagne océanographique MAYOBS21 (13 septembre - 4 octobre 2021), des fluides sont régulièrement émis et détectés entre 900 et 1000 m de profondeur, attestant de l'activité toujours en cours dans la zone du Fer à Cheval.** Des variations temporelles de concentrations en gaz dissous dans la colonne d'eau ont pu être observées mais doivent être interprétées avec prudence. L'analyse des résultats toujours en cours semble indiquer que la variabilité enregistrée ne serait pas uniquement liée à l'activité des sites actifs mais qu'elle pourrait être largement occasionnée par des forçages externes qu'il reste à mieux comprendre.

A l'heure actuelle, les données acquises par le planeur n'apportent pas d'indices probants de la présence de nouveaux sites majeurs d'émission de fluides en dehors de ceux déjà connus de la zone du Fer à Cheval, dans les limites des résolutions et des possibilités du planeur. Cela n'exclut pas la présence possible de panaches nouvellement apparus depuis septembre ou non identifiés lors des campagnes océanographiques MAYOBS antérieures à MAYOBS23 (dont les résultats sont toujours en cours d'analyse), qui seraient hors d'atteinte des capacités du planeur (concentrations faibles et inférieures aux limites de détection des capteurs, panaches remontant peu dans la colonne d'eau). Cependant, il est à noter la présence récurrente d'anomalies faibles mais significatives en gaz dissous (CH_4 et CO_2) observées en bordure de canyon, à l'ouest de la zone de la couronne. Ces anomalies sont surtout observées depuis que cette région est échantillonnée régulièrement (depuis le 22 Avril 2022), mais ne peuvent pour l'instant, et en l'état des connaissances actuelles, être reliées à un éventuel nouveau site actif. La comparaison entre les mesures réalisées par le planeur et celles obtenues pendant la campagne MAYOBS23 permettra une meilleure interprétation des résultats dans cette zone.

Lors de la campagne océanographique MAYOBS23 a été découvert un nouveau site actif dans la zone sud du Fer à Cheval, nommé J. Un nouvel objectif pour le planeur est de détecter ce site (concentrations de gaz dissous dans la colonne d'eau ou rétrodiffusion acoustique (BI)) également à l'aide des données acquises par l'engin. De plus, les observations de cette campagne ne permettent pas de valider une activité au niveau de la zone de la Couronne. Le choix pour la navigation du planeur a donc été fait de ne plus échantillonner la zone de la Couronne, au profit de la zone du nouvellement découvert site actif J.

L'acquisition de données par le sondeur coque multifaisceaux et les mesures de gaz dissous réalisées par prélèvement avec la CTD-Rosette pendant la campagne océanographique MAYOBS23 permettra de réitérer la cartographie et le suivi haute résolution



des sites actifs d'émissions de fluides (position, nombre, extension, intensité) et de comparer les résultats obtenus avec les données du planeur.

Entre le 1^{er} et le 31 octobre 2022, le planeur a effectué 29 jours en mer, réalisant 76 traversées, équivalent à 714 profils verticaux entre 900 et 1000 m (Figure 16). **Au total, 55 traversées sur 76 montrent des anomalies en gaz dissous, 34 dans la zone du Fer à Cheval et 21 dans la zone du site actif J au sud de la zone du Fer à Cheval. Sur la période considérée, 7 anomalies importantes (supérieures à 25 UR en CH₄ et 5 UR en CO₂ dissous) ont été mesurées au niveau de la zone du Fer à cheval, toutes ayant eu lieu lors des deux dernières semaines. Sur la période d'analyse, les sites A, B et C ont montré les valeurs de concentration relative les plus élevées. Les valeurs maximales mesurées sur le dernier mois atteignent 50.6 UR pour le CH₄ et 10.6 UR pour le CO₂.**

Durant les deux dernières semaines, des valeurs d'anomalies de gaz dissous en hausse ont été enregistrées, atteignant des niveaux comparables à ceux de septembre/octobre 2021 (Figures 17 et 18). Cette hausse est généralisée sur la zone du Fer à Cheval ainsi que dans la zone sud-ouest et la zone du site J0.

14 anomalies en indice de rétrodiffusion acoustique (BI), faisant référence à la détection de bulles et/ou gouttelettes, ont été détectées à proximité des sites A, B, et C (Figure 17). Ramené à des valeurs moyennes hebdomadaires on note, entre le 1^{er} et le 31 octobre 2022, une moyenne de 3.5 passages au niveau de panaches acoustiques par semaine, ce qui est proche de la valeur moyenne observée depuis le 17 septembre 2021.

Informations

Pour en savoir plus sur le planeur SeaExplorer :
<https://www.youtube.com/watch?v=L4xHD5y6DU4>

Glossaire

ADCP : Un ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler) est un instrument acoustique à effet Doppler permettant de mesurer les courants marins. L'ADCP utilisé sur le planeur est spécialement conçu pour mesurer la vitesse et la direction des courants marins depuis un planeur sous-marin. Cet instrument comporte 4 transducteurs qui transmettent et reçoivent des signaux acoustiques vers le bas, dans la gamme de fréquence des ultrasons (1 MHz). Les ondes émises se propagent et interagissent avec les particules en suspension dans l'eau de mer. En supposant qu'elles n'aient pas de vitesse propre, c'est-à-dire qu'elles se déplacent avec la masse d'eau, l'analyse du décalage en fréquence des signaux renvoyés permet d'estimer la vitesse du courant marin dans la direction des transducteurs. Dans le cadre de la mission Mayotte, des mesures sont effectuées toutes les 10 secondes dans 15 cellules de 2 m. Ces mesures sont ensuite combinées et traitées selon des algorithmes spécifiques qui permettent d'obtenir, d'une part, des profils de courant sur la couche 0-1000 m à 6h d'intervalles et, d'autre part, les indices de rétrodiffusion acoustique (BI). Pour en savoir plus : <https://www.nortekgroup.com/fr/knowledge-center/userstory/underwater-gliders-and-adcps>

CTD : Une CTD (Conductivity Temperature Depth) est une sonde multi-paramètres mesurant les profils de conductivité, température et profondeur de l'eau. Des quantités dérivées (densité, salinité) peuvent être déduites de ces mesures. La CTD utilisée sur le planeur est équipée d'une pompe et conçue par Sea-Bird, spécialement pour le SeaExplorer.

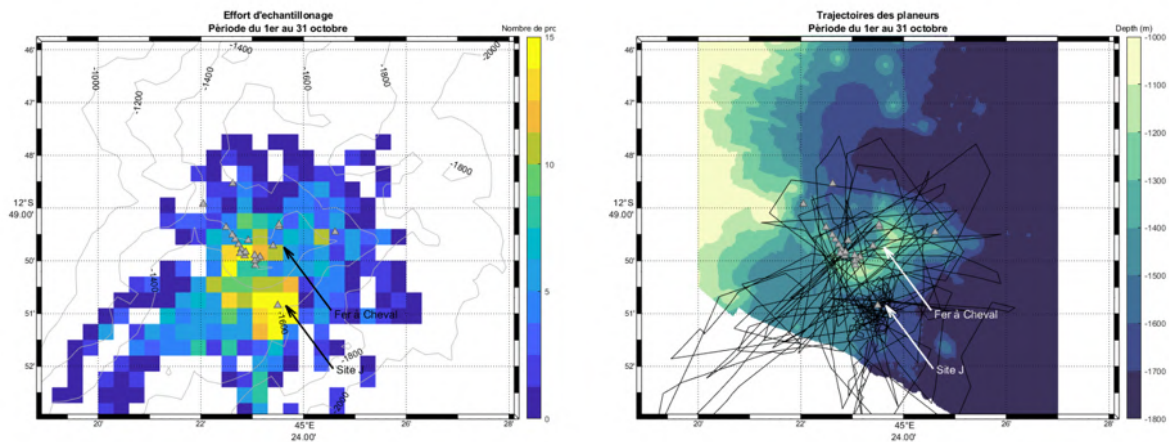


Figure 16 : (gauche) Carte montrant le nombre de profils acquis par le SeaExplorer dans des rectangles de 0,5 km², entre le 1^{er} et le 31 octobre 2022. (droite) Carte des trajectoires du planeur sous-marin sur la même période. Les triangles sont les sites actifs d'émission de fluides identifiés avec le sondeur multifaisceaux coque lors des campagnes MAYOBS du REVOSIMA.

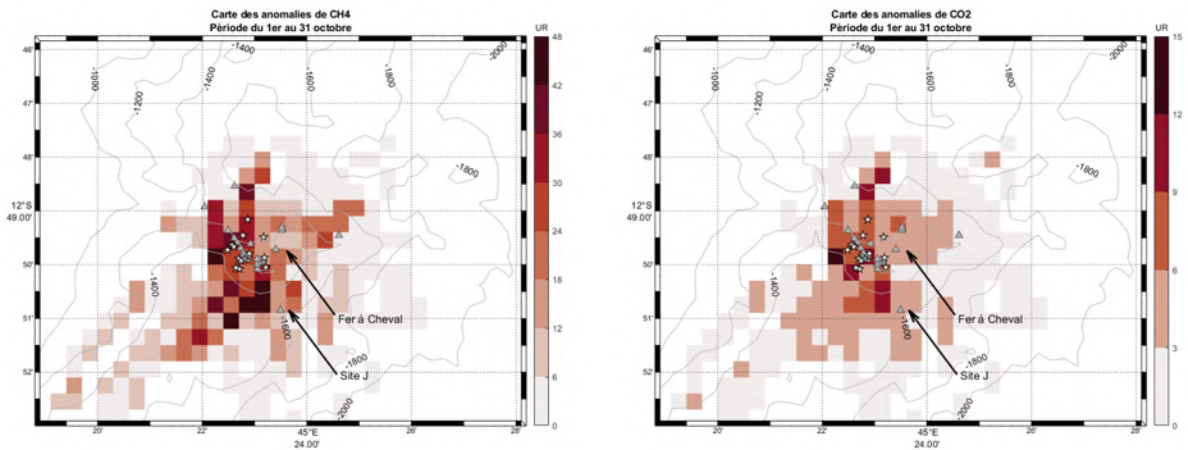


Figure 17 : Carte des anomalies en CH₄ (gauche) et CO₂ (droite) dissous mesurées entre 900 et 1000 m de profondeur par le planeur sous-marin entre le 1^{er} et le 31 octobre. L'échelle de couleur correspond à l'anomalie maximale en gaz dissous exprimée en unité relative dans des rectangles de 0,5 km². Sont aussi représentées par des étoiles les localisations des panaches acoustiques observés entre 900 et 1000 m de profondeur par le planeur sous-marin entre le 1^{er} et le 31 octobre 2022. Les triangles sont les sites actifs d'émission de fluides identifiés avec le sondeur multifaisceaux coque lors des campagnes MAYOBS du REVOSIMA.

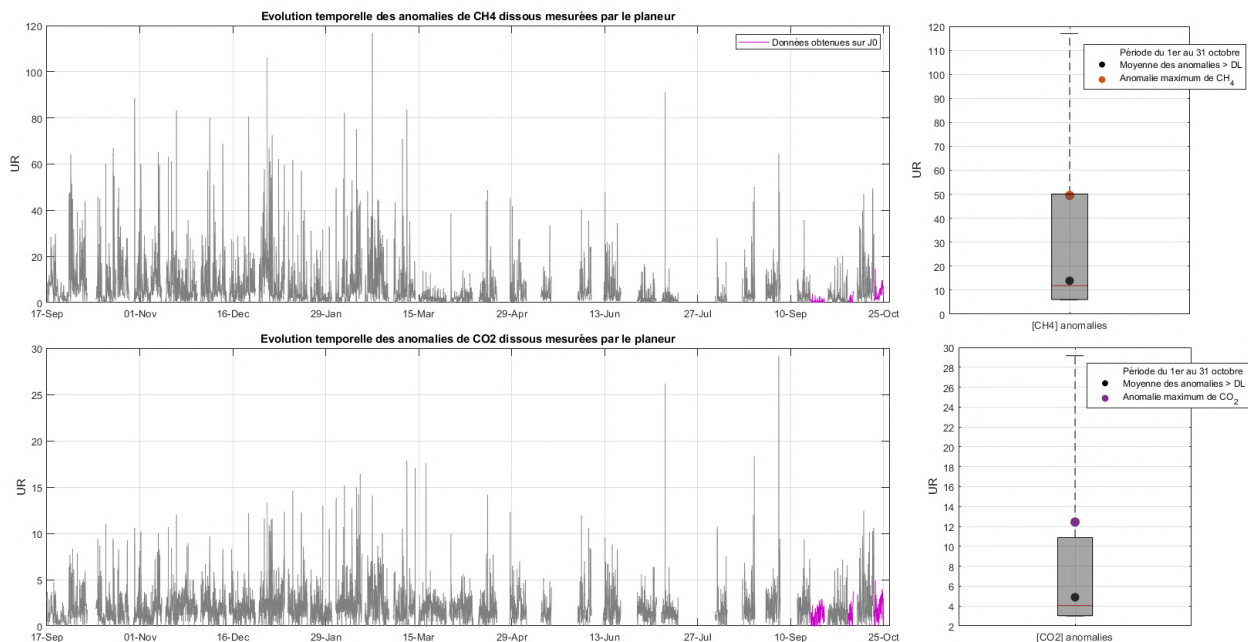


Figure 18 : Évolution temporelle des anomalies en CH_4 (haut) et CO_2 (bas) dissous mesurées entre 900 et 1000 m de profondeur par le planeur sous-marin entre le 17 septembre 2021 et le 31 octobre 2022. Chaque point de mesure correspond à la valeur maximale en gaz dissous enregistré sur un profil. Les diagrammes en boîte de la distribution des anomalies en CH_4 (haut) et CO_2 (bas) dissous enregistrées depuis le 17 septembre 2021. Le cercle noir représente la valeur moyenne en unités relatives des anomalies mesurées sur la période du 1^{er} au 31 octobre 2022.

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 montrent que l'éruption a produit, en date de fin octobre 2021, un volume estimé d'environ $6,55 \text{ km}^3$ 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 $172\text{-}181 \text{ m}^3/\text{s}$ 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 l'ordre de $81 \text{ m}^3/\text{s}$; 3) au nord 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 maximum (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 $11 \text{ m}^3/\text{s}$. La campagne MAYOBS17 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) n'a pas mis en évidence la présence de nouvelles coulées de lave dans la zone nord-ouest. **Lors des deux dernières campagnes, MAYOBS21 (13 septembre au 4 octobre 2021) et MAYOBS23 (9 au 22 juillet 2022), à nouveau, la présence de nouvelle coulée de lave n'a pas pu être 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 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) et MAYOBS19 (du 27 mai au 01 juin 2021) 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.

Géologie

Les six dragages de la campagne MAYOBS21 (13 septembre au 4 octobre 2021) 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 (**Figure 19**). **De nouveaux prélèvements géologiques par drague à roche ont également été réalisés lors de la dernière campagne MAYOBS23 (9 au 22 juillet 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.**

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.

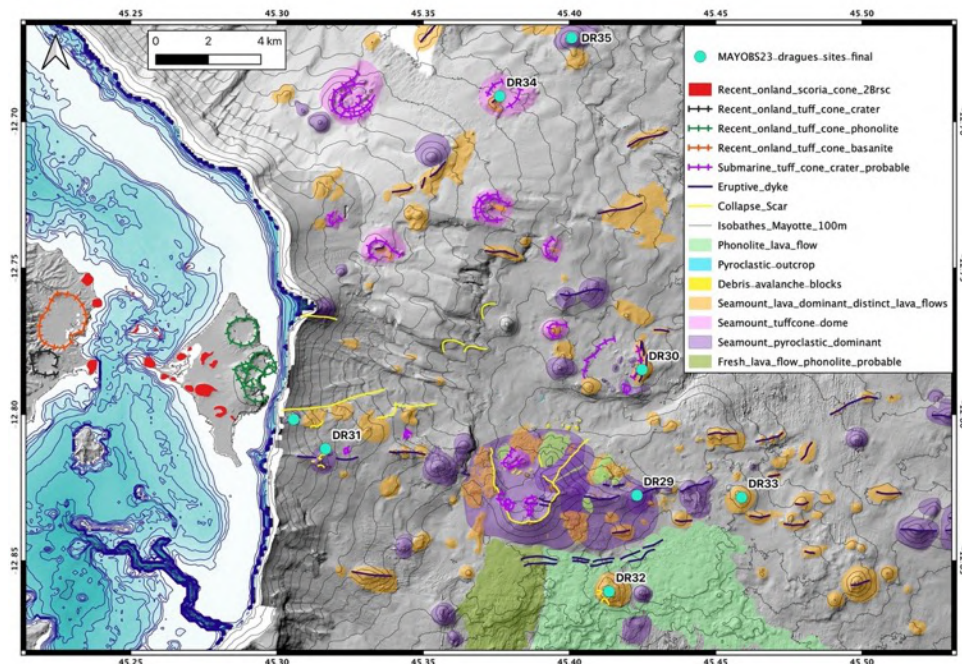


Figure 19 : Localisation des dragues effectuées lors de la campagne MAYOBS23 (©REVOSIMA).

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 Geosciences*, 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>
- 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>
- Boudoire, 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
- Boudoire, 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.iterre.fr/mayotte-seismo-volcanic-crisis>
- Bulletin du BCSF de juillet 2018 : http://www.franceseisme.fr/donnees/Note_macro-BCSF-RENAISS-Mayotte-13-07-2018.pdf
- Bulletins mensuels OVPF/IPGP : www.ipgp.fr/fr/dernieres-actualites/344
- 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
- Feuillet et al., Birth of a large volcano offshore Mayotte through lithosphere-scale rifting, *Nature Geosciences*, August 2021, <https://doi.org/10.1038/s41561-021-00809-x>
- 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
- 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>
- 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
- 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
- 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 (2022). A wrapper to use a machine-learning-based algorithm for earthquake monitoring, *Seismological Research Letter*, 93(3), 1673-1682.
- 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, T., Takahata, N., Nishio, Y., Rouleau, E., Pinti, D.L. and Fischer, T.P. (2015). Ten-year helium anomaly prior to the 2014 Mt Ontake eruption. *Scientific reports*, 5, 13069
- Saurel, J. M., Jacques, E., Aiken, C., Lemoine, A., Retailleau, L., Lavayssière, A., ... & Feuillet, N. (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
- Sigmarsson et al. (2015), *EPSL*, doi : 10.1016/j.epsl.2015.06.054
- 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.
- 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

Le comité du REVOSIMA,
le 7 novembre 2022



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/fr/volcan-marin-large-de-mayotte-retour-une-decouverte-exceptionnelle, www.ipgp.fr/fr/essaim-simique-a-lest-de-mayotte-mai-juin-2018
- Direction Risques et Prévention / Unité Risques sismique et volcanique
- Direction des Actions Territoriales / Direction régionale de Mayotte
- Le site du BRGM : https://www.brgm.fr/fr/actualite/dossier-thematique/volcan-seismes-mayotte-brgm-fortement-implique?pk_campaign=twitter&pk_kwd=2018-%2006_seismes-mayotte-faq
- Contacter le BRGM : <http://www.brgm.fr/content/contact>
- le site de l'IFREMER : <https://wwz.ifremer.fr/Espace-Presse/Communiqués-de-presse/Seismes-a-Mayotte-conclusions-de-la-seconde-campagne-oceanographique>
- le site de l'ENS : <http://volcano.terre.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, 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.