INSTITUT de PHYSIQUE du GLOBE de PARIS

BULLETIN MENSUEL
Réseau de surveillance volcanologique et sismologique de Mayotte - REVOSIMA

ISSN 2680 - 1205

REVOSIMA - IPGP – Octobre 2021

Bulletin de l'activité sismo-volcanique à Mayotte

Evolution au cours du dernier mois

- Entre le 1er et le 31 octobre 2021, 323 séismes Volcano-Tectoniques (VT ; séismes dont la gamme de fréquence est la plus large, de 2Hz à 40Hz), 105 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.

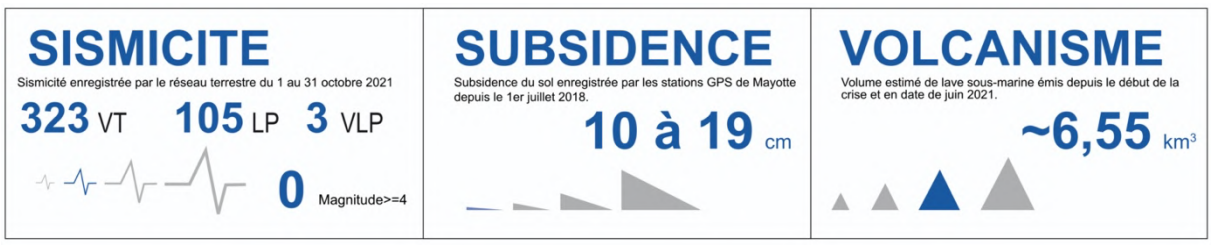
- Les déplacements de surface mesurés depuis le 1er juillet 2018 par les stations GPS de Mayotte indiquent :
a) un déplacement d'ensemble des stations GPS de Mayotte vers l'est d'env. 21 à 25 cm ;
b) un affaissement (subsidence) d'env. 10 à 19 cm selon leur localisation sur l'île. Depuis fin 2020, les déformations sont devenues négligeables.

Evènement en cours : éruption sous-marine, à 50-60 km à l'Est de Mayotte avec sismicité et déformations associées. Dernière preuve sans équivoque d'activité éruptive : 18/01/2021 lors de la campagne MAYOBS17.
Nouveau site éruptif sous-marin à l'Est de Mayotte découvert et suivi lors des campagnes océanographiques MAYOBS qui se succèdent plusieurs fois par an depuis le 02 mai 2019.

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

Volume de magma érupté en date de juin 2021: environ 6,55 km^3

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



REVOSIMA - IPGP – Octobre 2021

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, avec l'appui du 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'IPGS 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 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'Etat.

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

REVOSIMA - IPGP – Octobre 2021

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 (≤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 il y a moins de 7000 ans (*Zinke et al., 2003 ; 2005*). 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 ride 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 volcano-tectonique 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 épicentres regroupés en mer, entre 5 et 15 km à l'est de Petite-Terre pour l'essaim sismique proximal (le plus proche de Petite-Terre, nommé précédemment essaim principal), et à 25 km à l'est de Petite-Terre pour l'essaim sismique distal (le plus éloigné de Petite-Terre et qui s'étend le long de l'alignement de cônes volcaniques jusqu'au site éruptif, nommé précédemment essaim secondaire), à des profondeurs comprises majoritairement entre 25 et 50 km. La majorité de ces séismes est de faible magnitude, mais plusieurs évènements de magnitude modérée (max. M_w5.9 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 génère toujours des séismes de magnitudes proches de M4 ressentis à terre. Du 1er au 31 octobre 2021, 323 séismes Volcano-Tectoniques (VT), 105 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 1er 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'env. 10 à 19 cm selon leur localisation sur l'île. Un ralentissement des déplacements est observé depuis avril-mai 2019. 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. 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 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 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), hydrogène (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.

5. La structure volcanique du Fer à Cheval, située à l'aplomb de l'essaim sismique proximal (le plus proche de Petite-Terre, nommé précédemment essaim principal ; 5-15 km à l'Est de Petite-Terre), est une structure préexistante à l'éruption sous-marine 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. Ces panaches sont distribués sur 16 sites d'émission toujours en activité en septembre 2021. 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 simultanée avec 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 dernier 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. 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 depuis mai 2019 à 16 à la fin septembre 2021. 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 des concentrations élevées en dioxyde de carbone (CO_2), méthane (CH_4) et hydrogène (H_2), et des pH inférieurs à 7. Les analyses détaillées sont en cours. Ces

résultats, associés aux données en cours de traitement et d'acquisition, contribuent à la détermination de l'origine (dégazage de magma résidant en profondeur dans les racines des systèmes volcaniques ayant alimenté les éruptions de la zone du Fer à Cheval, interaction eau de mer et magma, eau de mer modifiée chimiquement par réactions thermiques associées à l'activité hydrothermale et magmatique de la zone) et de l'intensité du processus sous le plancher océanique générant les émissions de fluides dans la colonne d'eau.

6. En l'état actuel des connaissances, l'éruption a produit un volume estimé d'environ 6,55 km^3 de lave depuis le début de son édification (sans correction de la vésicularité très variable des laves émises). Selon les différents modèles et interprétations proposées à ce jour, l'éruption aurait pu débuter le 18 juin 2018 (modèle de *Cesca et al., 2020*), voire le 3 juillet 2018 (modèle de *Lemoine et al., 2020*). Sur une période de 10 mois (de juillet 2018 - début des déformations de surface enregistrées à Mayotte – au 18 mai 2019), le flux éruptif minimum moyen de lave a été d'environ 172-181 m^3/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 km^3 de lave en 30 jours (19 mai-17 juin 2019) pour un flux minimum moyen de l'ordre de 77m^3/s ; 2) à l'ouest environ 0,3 km^3 de lave en 43 jours (entre le 18 juin et le 30 juillet 2019) pour un flux minimum moyen de 81 m^3/s ; 3) au nord-ouest environ 0,08 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 m^3/s ; 4) au nord-ouest environ 0,8 km^3 de lave en 265 jours (entre le 21 août 2019 et le 11 mai 2020) pour un flux minimum moyen de l'ordre de 35 m^3/s ; 5) au nord-ouest entre 0,1 à 0,2 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 m^3/s. Les volumes et flux éruptifs, notamment au début de la crise, sont exceptionnels et sont, malgré les incertitudes, parmi les plus élevés observés sur un volcan effusif depuis l'éruption du Laki (Islande) en 1783.

7. Des dégagements terrestres gazeux importants d'origine hydrothermale (majoritairement CO_2) et de faible température sont connus depuis de nombreuses années (au moins depuis 1998) sur l'estran de la plage de l'aéroport (sud Petite-Terre) et au sein du Lac Dziani. Depuis décembre 2018, quatre campagnes ont été effectuées par l'OVPF/IPGP pour le suivi et l'échantillonnage des émissions de gaz par le sol et des zones de bullages.

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).

Des données de carottage ont été acquises proche des côtes de l'île de Mayotte, au niveau de la zone affectée par l'éruption volcanique sous-marine en cours, lors de la campagne MAYOBS 19 (du 27 mai au 01 juin 2021). Leur analyse va fournir de nouvelles informations concernant sur le volcanisme historique de Mayotte en reconstruisant la chronologie et la succession des évènements volcaniques ayant eu lieu dans la région.

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, MAYOSB15, sur le site de l'éruption en cours 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< SiO2 pds%<47), légèrement évoluées (téphrites, 3,6<MgO pds%<5,3), avec des valeurs de porosité s'étalant de 14 à 50 %. 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).

11. La province volcanique sous-marine proche de l'ile 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'essaim 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 210Po-210Pb avec un rapport (Po/Pb) de 0,99 +/- 0,03, indifférenciable de 1 et un équilibre 210Pb et 226Ra avec là aussi, un rapport (Pb/Ra) de 0,99 +/- 0,03, indifférenciable de la valeur d'équilibre, selon les dernières analyses (octobre 2020). Si (au conditionnel) ces trois isotopes 210Po, 210Pb, 226Ra 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 210Po) et même plus vieux que 132 ans (d'après la période de 22 ans de 210Pb). Des datations par la mesure du 230Th sont donc nécessaires afin de tester s'il existe un déséquilibre 226Ra-230Th, 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 seront aussi réalisées sur les produits explosifs anciens de la zone du Fer à Cheval échantillonnés dans les dragues MAYOBS15-DR16 et MAYOBS15-DR17. 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.

REVOSIMA - IPGP – Octobre 2021

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'essaim 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'un.e 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 (http://www.ipgp.fr/sites/default/files/190823_1er_bulletin_info_sismo_volcanique_mayotte.pdf).

Avec le recrutement de nouveaux personnels 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 évènements, mais nécessitent que les données arrivent en temps réel et que la magnitude des évènements soit suffisamment élevée pour avoir du signal sur toutes les stations de mesure. Les évènements 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 évènements de plus petite magnitude seulement visibles sur les stations les plus proches des évènements 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 maintien 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 mois environ à l'heure actuelle.

Depuis le 1er 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. 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'évènements. 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 évènements 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 neurone 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. Ces améliorations sont le résultat des travaux effectués en 2020 par deux chercheuses en contrats post-doctoraux financés par le REVOSIMA.

Entre le 1er et le 31 octobre 2021, le Réseau de surveillance Volcanologique et Sismologique de Mayotte (REVOSIMA) a détecté, avec le réseau de stations terrestres, un total de 323 séismes Volcano-Tectoniques (VT ; séismes dont la gamme de fréquence est la plus large, de 2Hz à 40Hz), 105 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 décru progressivement de mai à juillet 2020 et est depuis stable, avec quelques fluctuations. Les séismes de plus forte magnitude (énergie), dont le dernier ressenti s'est produit le 1er septembre (M3.55), ont lieu majoritairement dans l'essaim distal depuis plusieurs mois (essaim 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). En revanche, la sismicité basse fréquence (séismes longue-période et très longue-période) est toujours présente dans l'essaim proximal et est relativement stable.

- Sur le dernier mois, 105 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. Ainsi, sur le dernier mois 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 fluide (magmatique ou hydrothermal). Les signaux LP sont localisés à une dizaine de kilomètres à l'est de Petite-Terre dans la zone de l'essaim 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, 245 séismes ont pu être localisés manuellement (230 VT et 15 LP; **Figure 1a**), dont 65 VT de magnitude M2 à M3 et 6 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**).

- Ramené à des valeurs moyennes quotidiennes on note, entre le 1er et le 31 octobre 2021, une moyenne de 8 séismes localisables par jour.

REVOSIMA - IPGP – Octobre 2021

- 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.

Période du : 1er au 31 octobre 2021

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 1er au 30 septembre 2021 détectés selon le même protocole)

Classe de magnitude	Nombre de Séismes
M < 1	14 (19)
M1 à M2	145 (135)
M2 à M3	65 (63)
M3 à M4	6 (7)
M4 à M5	0 (0)
M5 à M6	0 (0)
M1-M6	216 (205)
M>= 2	71 (70)

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 1er au 31 octobre 2021.

Total séismes >=3.5	Dont M >= 4.0	Dont M >= 4.5	Dont M >= 5.0	Dont M >= 5.5
2055	567	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 2021 par classe de magnitude (base de données BRGM et REVOSIMA).

- 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 les deux séismes des 01 et 02 janvier 2020, et celui du 21 mars 2020.

- A noter que plusieurs séismes « proches » de très faible à faible magnitude (M1-M2,5) sont toujours enregistrés entre l'essaim 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/

REVOSIMA - IPGP – Octobre 2021

Localisation

Il n'y a pas eu d'évolution spatiale notable de la localisation de la sismicité entre le 1er et le 31 octobre 2021 par rapport au bulletin précédent (voir **Figures 1 et 2)**.

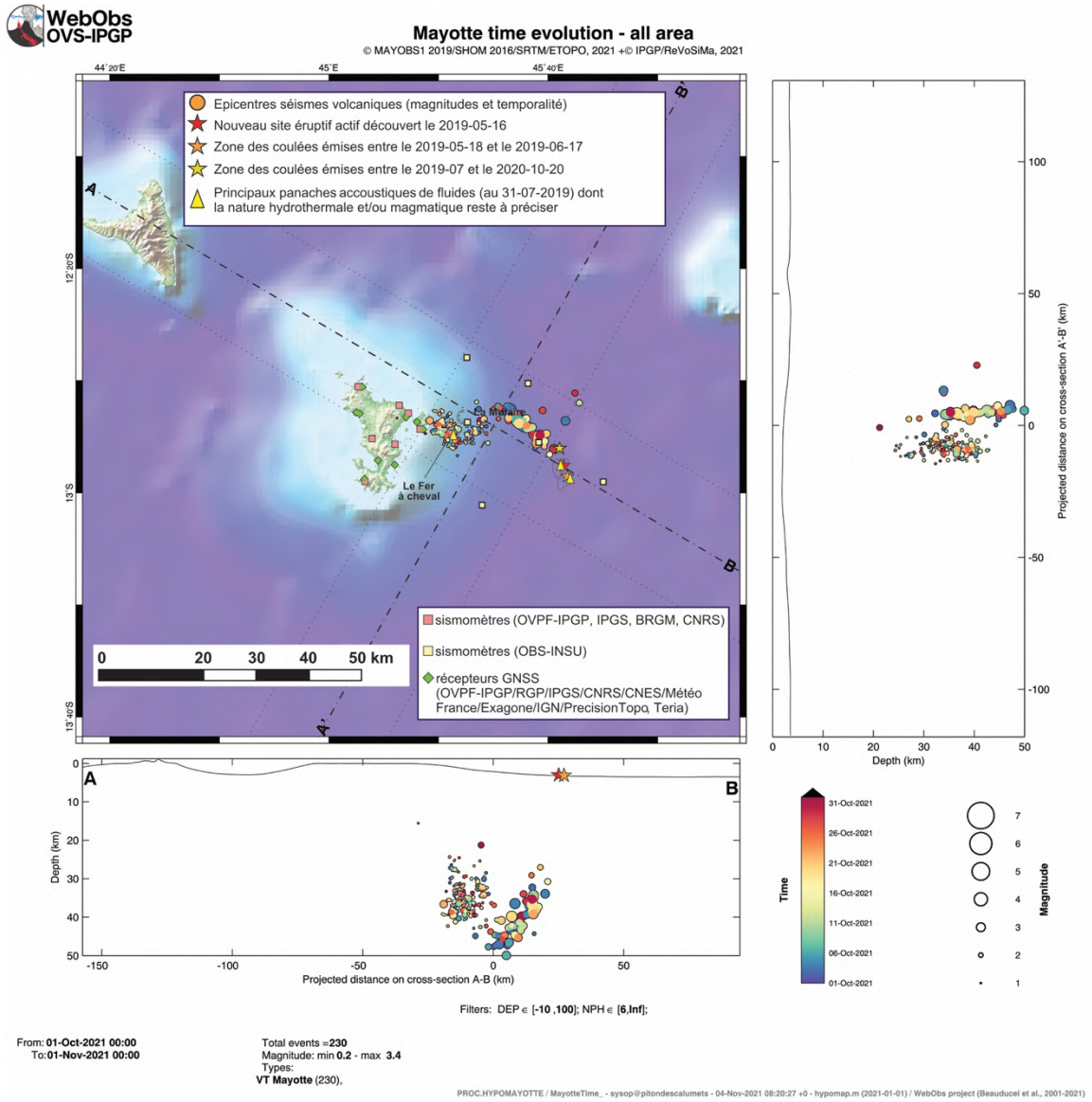


Figure 1a : Carte des épicentres (± 5 km) des séismes volcano-tectoniques (VT) localisés avec les réseaux sismiques à terre (IPGP-IFREMER-CNRS-BRGM-BCSF-RENASS, IPGS) entre le 1er et 31 octobre 2021 (échelle temporelle de couleur). Sont aussi représentées une projection des hypocentres des séismes le long de coupes transverses et axiales le long de la ride montrant la localisation estimée en profondeur (la précision varie entre +-5 km et +-15 km) des séismes en fonction de la magnitude (taille des symboles et de la date (échelle temporelle de couleur). La localisation approximative des panaches acoustiques identifiés pendant les campagnes océanographiques (MD220-MAYOBS1, MD221-MAYOBS2, MD222-MAYOBS3, MD223-MAYOBS4, MAYOBS15, 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 » sont indiquées en grisé tout comme les coulées de lave du site éruptif. 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-RENASS, IPGS / REVOSIMA).

REVOSIMA - IPGP – Octobre 2021

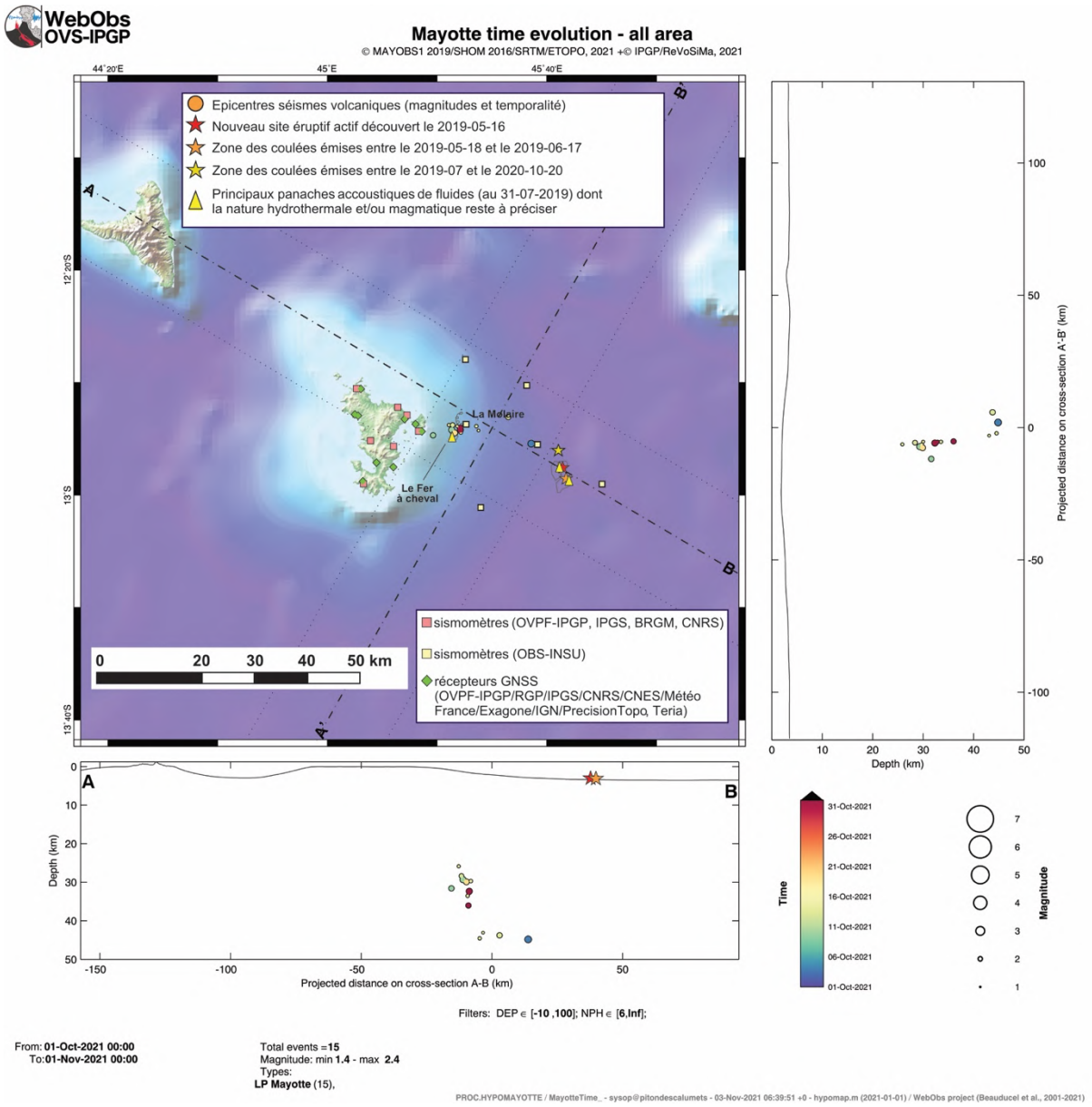


Figure 1b : Carte des épicentres (± 5 km) des séismes longue période (LP) localisés avec les réseaux sismiques à terre (IPGP-IFREMER-CNRS-BRGM-BCSF-RENASS, IPGS) entre le 1er et 31 octobre 2021 (échelle temporelle de couleur). Sont aussi représentées une projection des hypocentres des séismes le long de coupes transverses et axiales le long de la ride montrant la localisation estimée en profondeur (la précision varie entre +-5 km et +-15 km) des séismes en fonction de la magnitude (taille des symboles et de la date (échelle temporelle de couleur). La localisation approximative des panaches acoustiques identifiés pendant les campagnes océanographiques (MD220-MAYOBS1, MD221-MAYOBS2, MD222-MAYOBS3, MD223-MAYOBS4, MAYOBS15, 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 Molaire » sont indiquées en grisé tout comme les coulées de lave du site éruptif. 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-RENASS, IPGS / REVOSIMA).

REVOSIMA - IPGP – Octobre 2021

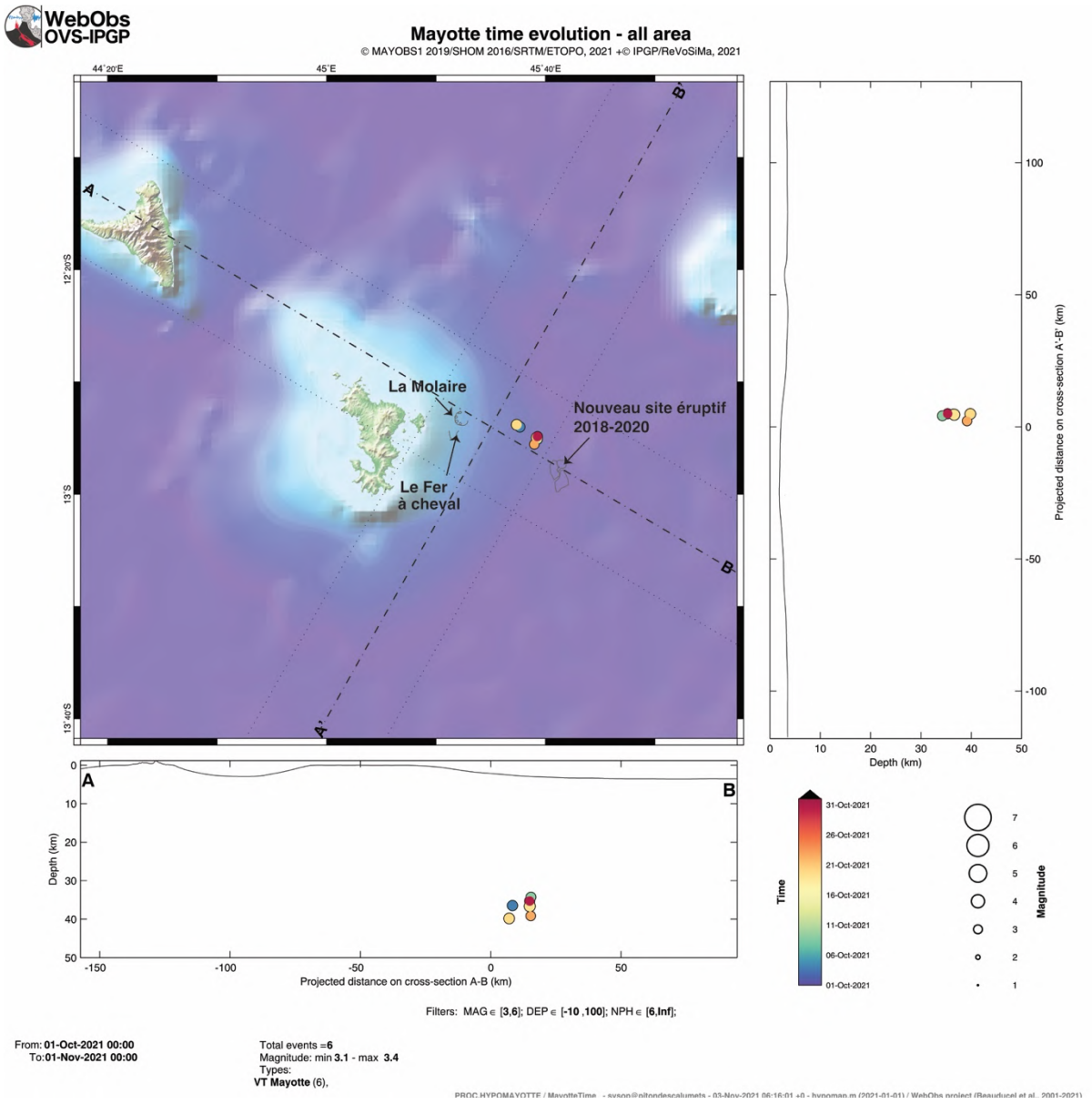


Figure 1c : Carte de localisation des épicentres (± 5 km) des séismes volcano-tectoniques (VT) de magnitude M ≥ 3 entre le 1er et le 31 octobre 2021 enregistrés avec les réseaux sismiques à terre (IPGP-IFREMER-CNRS-BRGM-BCSF-RENASS, IPGS). Sont aussi représentées une projection des hypocentres des séismes le long de coupes transverses et axiales le long de la ride montrant la localisation estimée en profondeur (la précision varie entre +-5 km et +-15 km) des séismes en fonction de la magnitude (taille des symboles) et de la date (échelle temporelle de couleur). Les structures volcaniques de la zone dite de « La Molaire », du « Fer à cheval » sont indiquées en grisé tout comme les coulées de lave du site éruptif. De nombreux points de sortie de panaches de fluides dans la colonne d'eau ont été identifiés dans la structure du Fer à Cheval avec une signature géochimique magmatique (voir section Géochimie des fluides). © OVPF-IPGP, BRGM, IFREMER, CNRS, BCSF-RENASS, IPGS / REVOSIMA).

REVOSIMA - IPGP – Octobre 2021

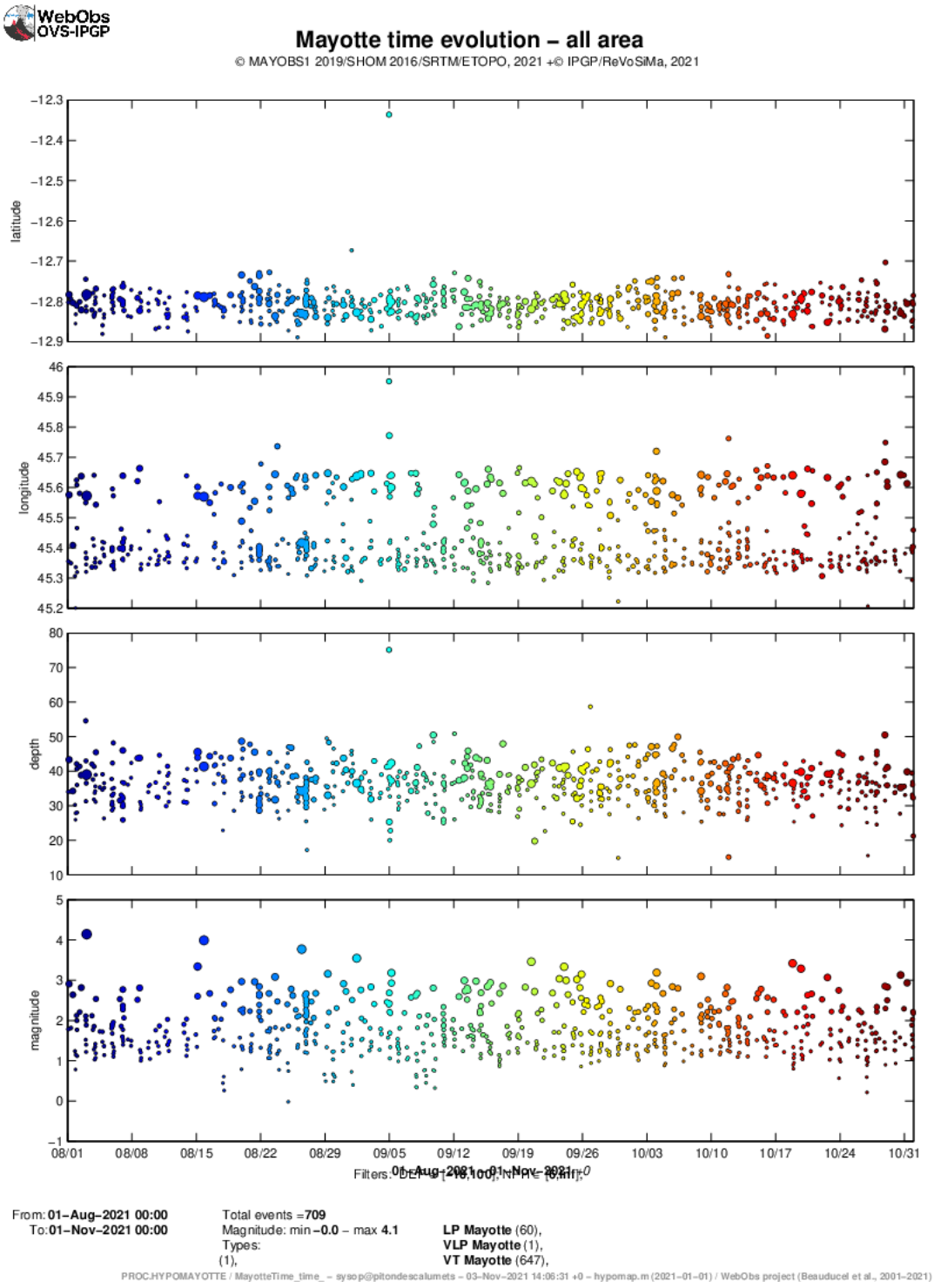


Figure 2 : Variation temporelle (échelle de couleur) des principaux paramètres (latitude, longitude, profondeur et magnitude) de la sismicité enregistrée et localisée par le REVOSIMA avec les réseaux sismiques à terre (IPGP-IFREMER-CNRS-BRGM-BCSF-RENASS, IPGS) entre le 1er juillet et le 31 octobre 2021 (3 mois). Se référer à la Figure 1 pour l'échelle des magnitudes (taille des symboles). (© OVPF- IPGP, BRGM, IFREMER, CNRS, BCSF-RENASS, IPGS / REVOSIMA).

REVOSIMA - IPGP – Octobre 2021

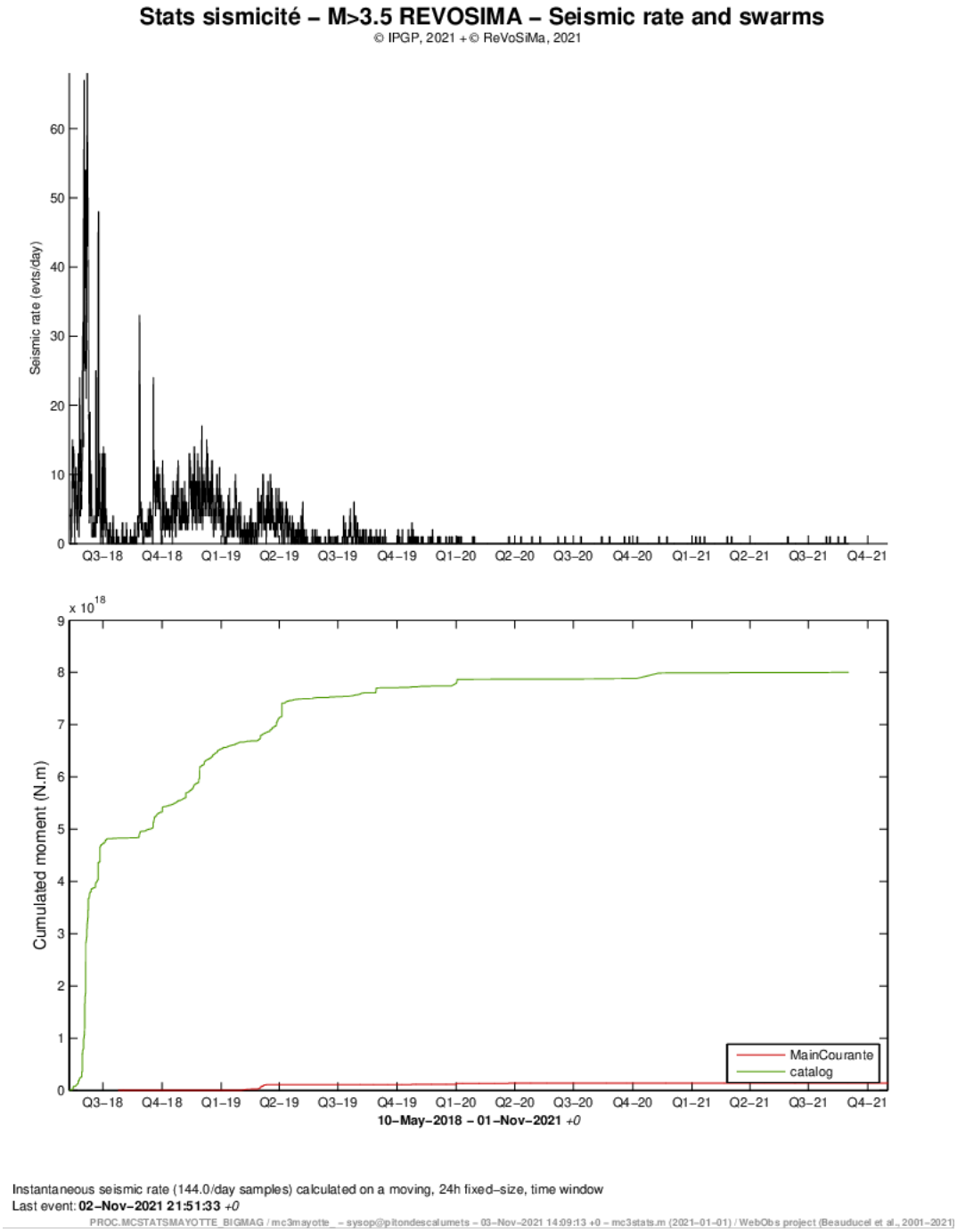


Figure 3 **:** En haut : Evolution temporelle du taux instantané de la sismicité volcano-tectonique (VT ; M > 3.5) calculé sur une fenêtre de 24h glissante toutes les 10 minutes depuis le 10 mai 2018. En bas : Evolution temporelle du moment sismique cumulé, en N.m (représentant le cumul de l'énergie 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).

REVOSIMA - IPGP – Octobre 2021

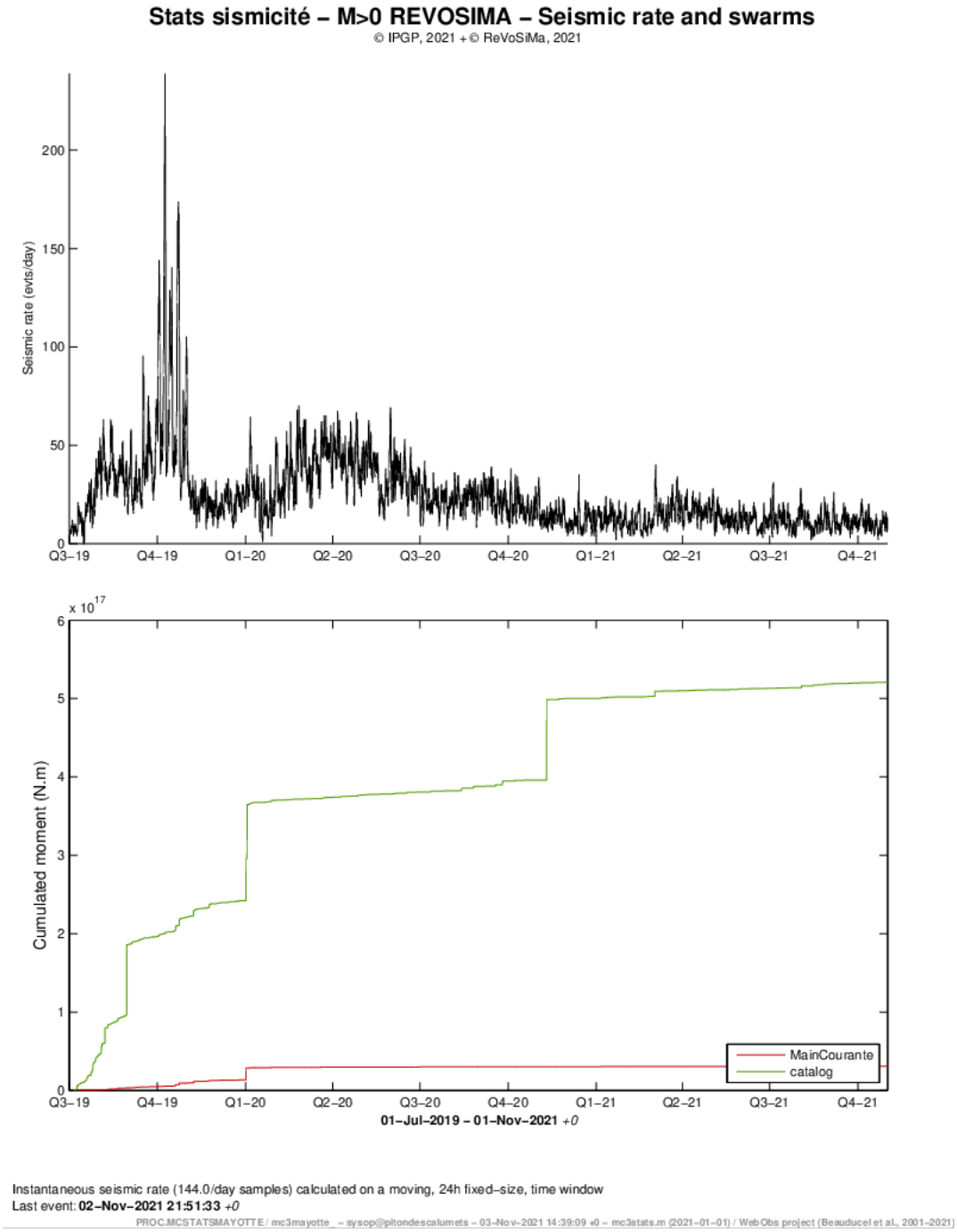


Figure 4 **:** En haut : Evolution temporelle du taux instantané de la sismicité volcano-tectonique (VT ; M > 0) calculé sur une fenêtre de 24h glissante toutes les 10 minutes entre le 1er juillet 2019 (mise en place du REVOSIMA) et le 31 octobre 2021. bas : Evolution temporelle du moment sismique cumulé, 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).

REVOSIMA - IPGP – Octobre 2021

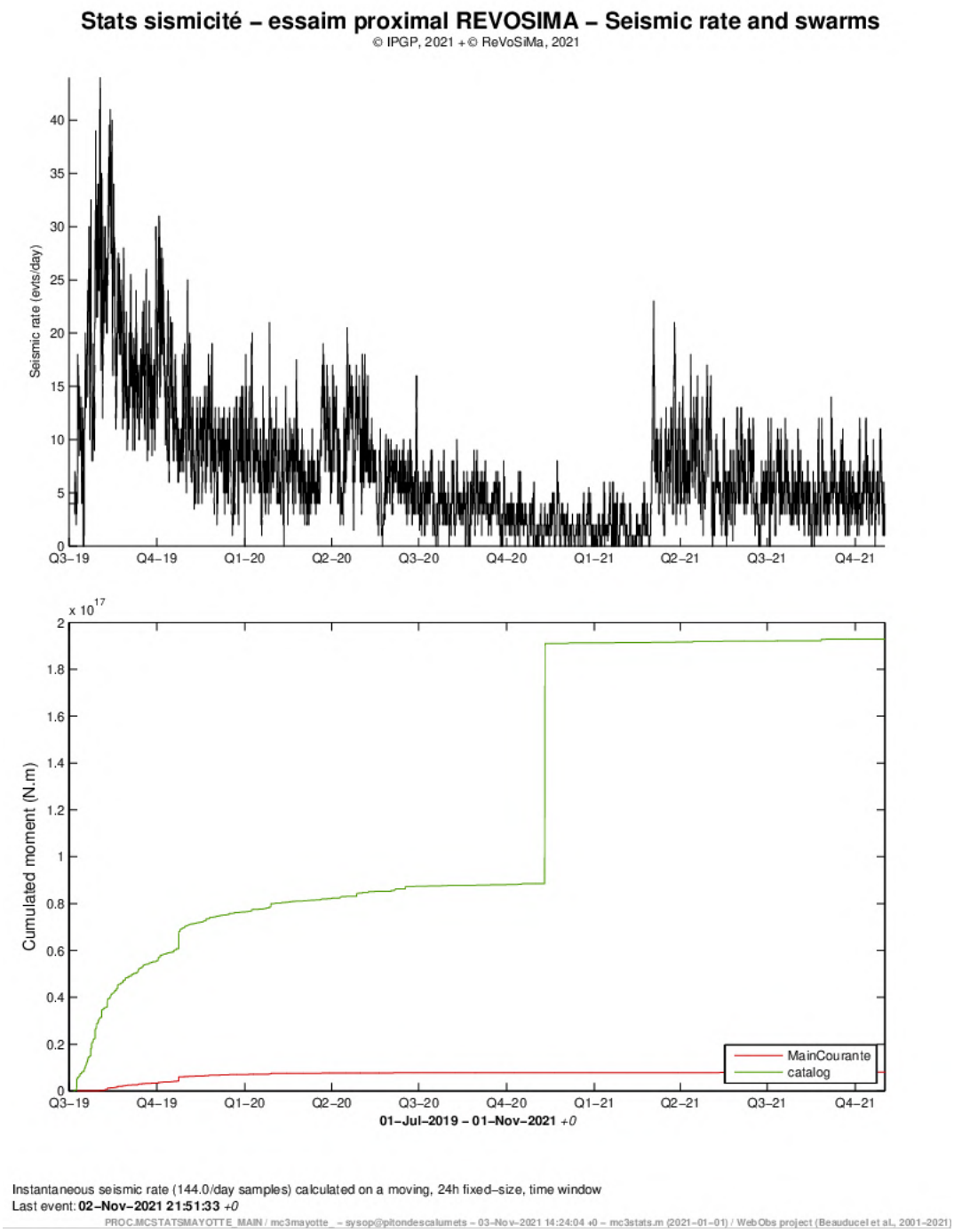


Figure 5 : En haut : Evolution temporelle du taux instantané de la sismicité volcano-tectonique (VT ; M > 0) calculé sur une fenêtre de 24h glissante toutes les 10 minutes entre le 1er juillet 2019 (mise en place du REVOSIMA) et le 31 octobre 2021 et pour **la zone de l'essaim proximal uniquement**. Sur ce graphique ne sont pris en compte que les séismes localisés. En bas : Evolution 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 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).

REVOSIMA - IPGP – Octobre 2021

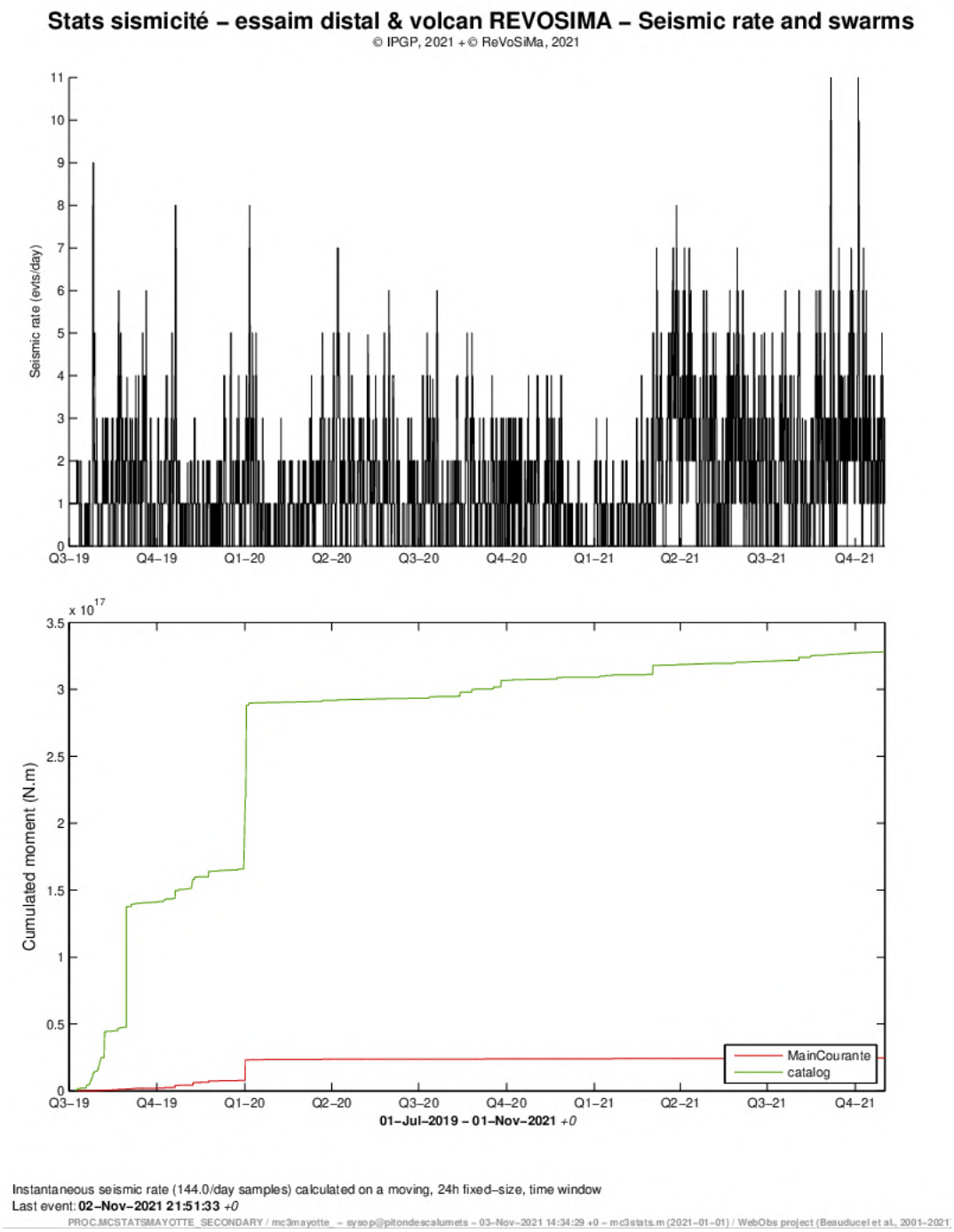


Figure 6 : En haut : Evolution temporelle du taux instantané de la sismicité volcano-tectonique (VT ; M > 0) calculé sur une fenêtre de 24h glissante toutes les 10 minutes entre le 1er juillet 2019 (mise en place du REVOSIMA) et le 31 octobre 2021 et pour **la zone de l'essaim distal uniquement**. Sur ce graphique ne sont pris en compte que les séismes localisés. En bas : Evolution 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).

REVOSIMA - IPGP – Octobre 2021

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@ (station 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) installée 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 1er juillet 2018 ces déplacements horizontaux sont d'environ 21 à 25 cm vers l'est, et l'affaissement (subsidence) d'environ 10 à 19 cm suivant les sites (**Figure 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.

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.

REVOSIMA - IPGP – Octobre 2021

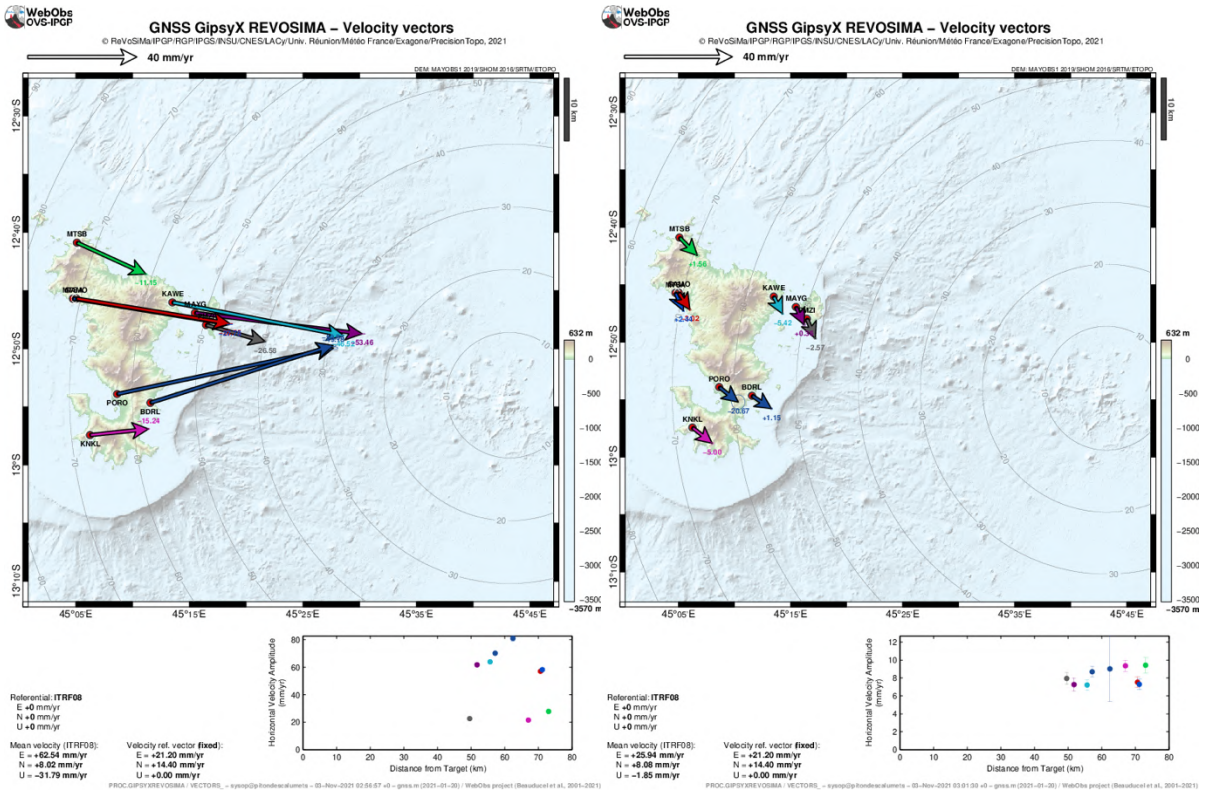


Figure 7 : Déplacements du sol enregistrés sur les stations GPS de Mayotte depuis le 1er juillet 2018 (à gauche) et sur les derniers douze mois (à droite). Les déplacements horizontaux sont représentés sous forme vectorielle et les déplacements verticaux sont indiqués par les valeurs chiffrées en couleur.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

REVOSIMA - IPGP – Octobre 2021

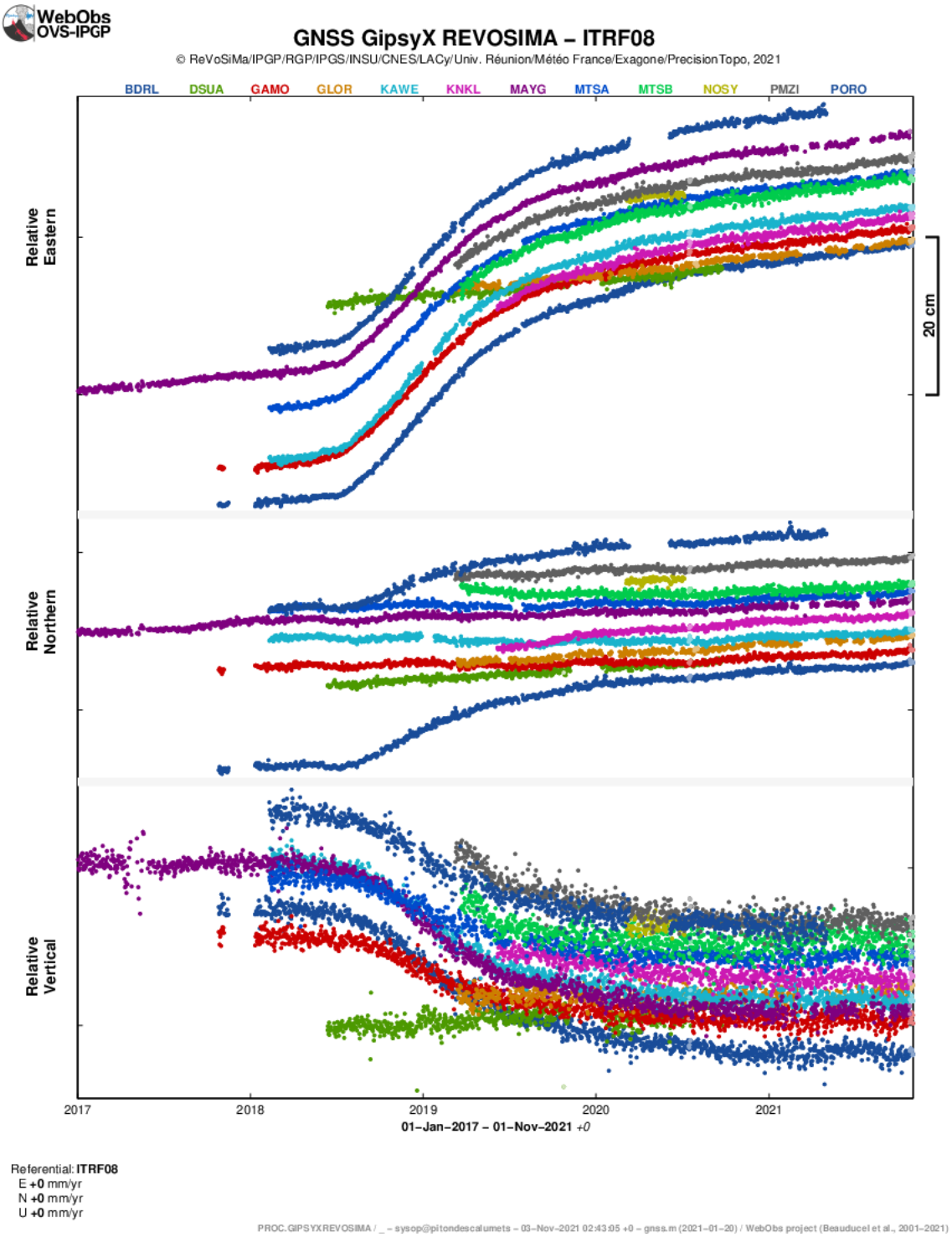


Figure 8 : Déplacements (en cm) enregistrés sur 9 stations GPS localisés à Mayotte (BDRL, GAMO, KAWE, KNKL, MAYG, MTSA, MTSB, PMZI, PORO), 1 station à Grande Glorieuse (GLOR) et 2 stations au nord de Madagascar à Diego Suarez (DSUA) et Nosy Be (NOSY) sur les composantes est (en haut), nord (au milieu) et vertical (en bas) entre le 1er janvier 2017 et le 31 octobre 2021 pour visualiser une longue série temporelle anté-crise. Post-traitement de ces données réalisé par l'IPGP (©OVPF-IPGP / REVOSIMA).

REVOSIMA - IPGP – Octobre 2021

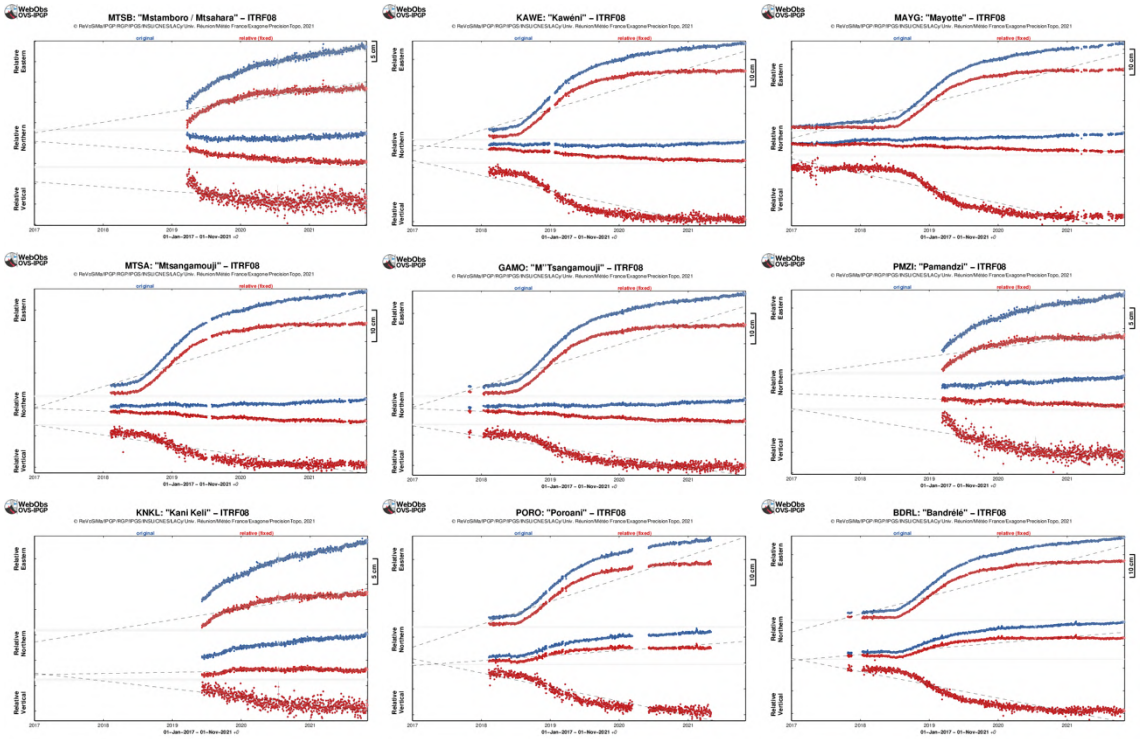


Figure 9 : Déplacements (en cm) enregistrés sur les 9 stations GPS localisés à Mayotte (MTSB, KAWE, MAYG, MTSA, GAMO, PMZI, KNKL, PORO, BDRL) entre le 1er janvier 2017 et 31 octobre 2021 pour visualiser une longue série temporelle anté-crise. En bleu les données brutes, en rouge les données corrigées du mouvement de la plaque. Les stations sont présentées dans un ordre géographique ; du nord au sud (de haut en base à 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 CO_2 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).

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 CO_2 par le sol a été installée par l'OVPF/IPGP à proximité de la plage de l'aéroport. Le CO_2 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 CO_2 et du Rn par exemple dans les points bas et les zones non ventilées. Au cours du mois d'octobre 2021, les émissions de CO_2 par le sol enregistrées sur la station permanente ont été stables sur des valeurs faibles.

REVOSIMA - IPGP – Octobre 2021

- **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. Ces panaches sont distribués sur 16 sites d'émission toujours en activité à la fin septembre 2021 (**Figure 10**). 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 simultanée avec 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 dernier site actif I_0 a été observé le 20 septembre lors de la couverture acoustique de surveillance du Fer à Cheval pendant la campagne MAYOBS21. 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 depuis mai 2019 à 16 à la fin septembre 2021. 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 des concentrations élevées en dioxyde de carbone, méthane et hydrogène, et des pH inférieurs à 7. Les analyses détaillées sont en cours. Ces résultats, associés aux données en cours de traitement et d'acquisition, contribuent à la détermination de l'origine (dégazage de magma résidant en profondeur dans les racines des systèmes volcaniques ayant alimenté les éruptions de la zone du Fer à Cheval, interaction eau de mer et magma, eau de mer modifiée chimiquement par réactions thermiques associées à l'activité hydrothermale et magmatique de la zone) et de l'intensité du processus sous le plancher océanique générant les émissions de fluides dans la colonne d'eau.

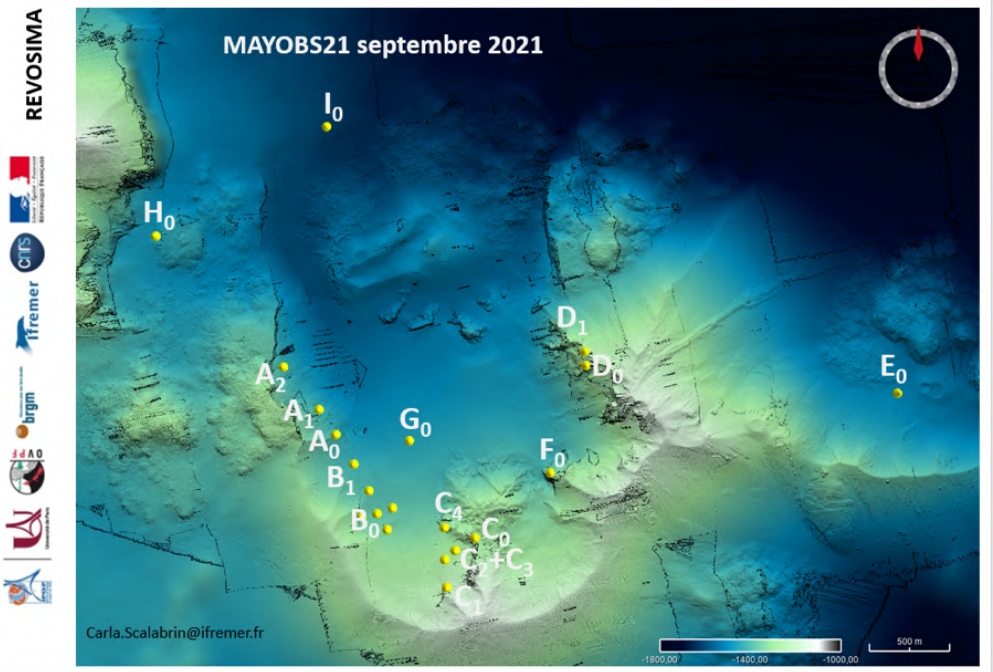


Figure 10 : Répartition des sites actifs (panaches acoustiques) dans la zone du Fer à Cheval (©REVOSIMA).

REVOSIMA - IPGP – Octobre 2021

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 2020, un volume estimé d'environ 6,55 km^3 de lave depuis le début de son édification (sans correction de la vésicularité très variable des laves émises). Selon les différents modèles et interprétations proposées à ce jour, l'éruption aurait pu débuter le 18 juin 2018 (modèle de *Cesca et al., 2020*), voire le 3 juillet 2018 (modèle de *Lemoine et al., 2020*). Sur une période de 10 mois (de juillet 2018 - début des déformations de surface enregistrées à Mayotte – au 18 mai 2019), le flux éruptif minimum moyen de lave a été d'environ 172-181 m^3/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 km^3 de lave en 30 jours (19 mai-17 juin 2019) pour un flux minimum moyen de l'ordre de 77m^3/s ; 2) à l'ouest environ 0,3 km^3 de lave en 43 jours (entre le 18 juin et le 30 juillet 2019) pour un flux minimum moyen de 81 m^3/s ; 3) au nord environ 0,08 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 m^3/s. ; 4) au nord-ouest environ 0,8 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 m^3/s ; 5) au nord-ouest entre 0,1 à 0,2 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 m^3/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 MAYOBS 18 (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 de la campagne MAYOBS 21, qui s'est déroulée du 13 septembre au 4 octobre 2021, de nouveau il n'a pas été mis en évidence, la présence de nouvelles coulées de lave. Les volumes et flux éruptifs, notamment au début de la crise, sont exceptionnels et sont, 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*). Les flux éruptifs seront mis à jour en fonction des nouvelles données de campagnes et seront intégrés au modèle conceptuel de l'éruption et comparés aux flux de transfert de magma issus des modélisations du champ de déformation et aux autres données de surveillance.

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 MAYOBS 18 (du 09 au 13 avril 2021) et MAYOBS 19 (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.

REVOSIMA - IPGP – Octobre 2021

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 chaine 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 11**).
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 chaine 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 de la formation du nouveau volcan et notamment la mise en place des premières coulées de laves sur de grandes distances et la composition du magma émis lors des phases initiales de l'éruption caractérisées par les plus forts débits éruptifs (quantité de lave émise par seconde), ainsi que les taux d'énergie sismique libérée et de déformation (déflation) les plus élevés de l'éruption ; une de ces coulées n'avait pas encore été échantillonnées.

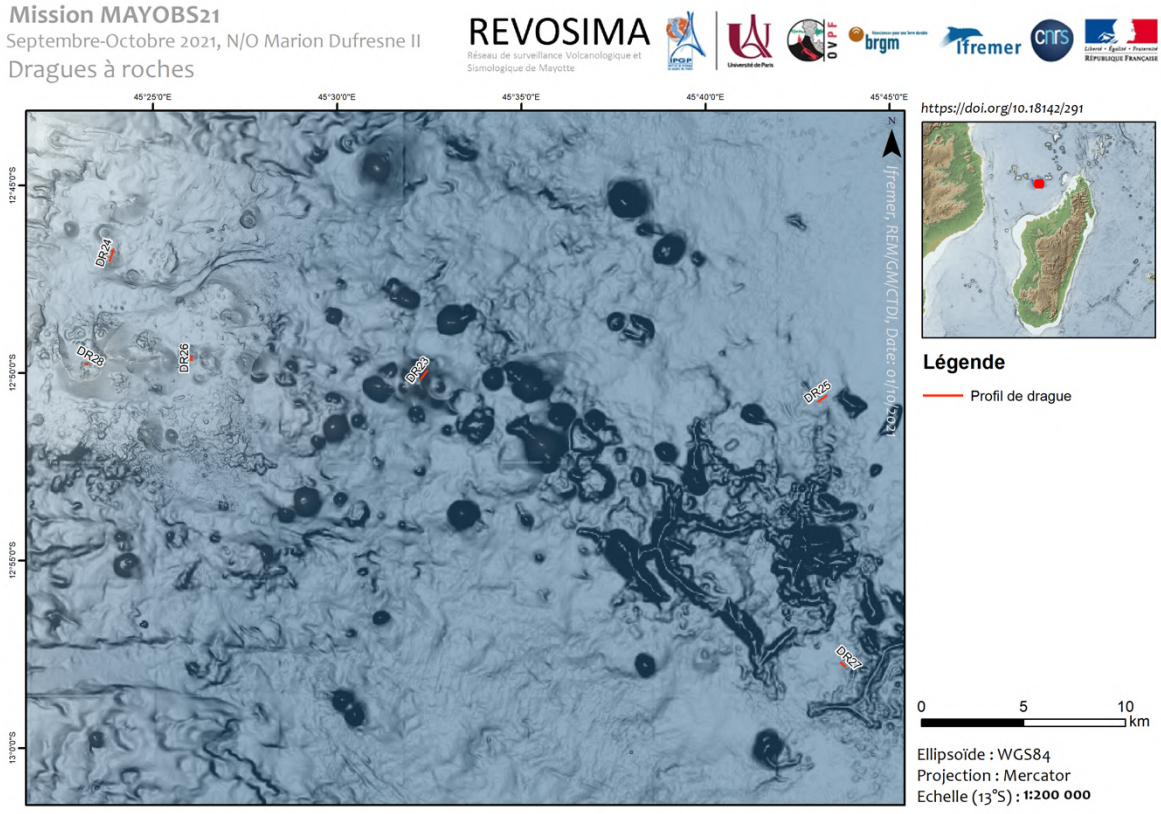


Figure 11 : Localisation des dragues effectuées lors de la campagne MAYOBS21 (©REVOSIMA).

REVOSIMA - IPGP – Octobre 2021

Une description des échantillons est présentée ci-dessous.

1) Drague DR23 – édifice ancien

La drague (DR 23) est située sur un édifice localisé au milieu de la chaine volcanique, situé à plus de 2000 m de profondeur. C'est un cône pyroclastique (faciès de retombés et de déferlantes pyroclastiques), formé par des éruptions explosives et très probablement de composition phonolitique. On note la présence de manganèse sous forme d'encroutement et de minéralisation dans les fractures et dans la porosité du dépôt pyroclastique. Le magma de cette éruption a probablement une origine assez profonde (>15 km) car il contient des enclaves mantéliques.

2) Drague DR24 – édifice ancien

La drague DR24 est située sur le rebord ouest d'un des édifices formant la Couronne au sud de la DR06, localisé au nord du Fer à cheval, à 1500 m de profondeur. Cet édifice est probablement un cône de composition phonolitique associé à des faciès de retombées et de déferlantes pyroclastiques soulignant une activité explosive. Cependant, on note également la présence de fragments de coulée de lave dû à une active effusive. Ces fragments d'apparence peu altérée sont de composition basanitique et présente une texture vésiculée. Ces caractéristiques sont similaires aux échantillons prélevés sur le nouveau volcan (DR08 et DR11).

3) Drague DR25 – nouveau volcan

La drague DR25 est située sur une coulée de faible épaisseur mais qui recouvre une grande surface tout au nord sur le nouveau volcan. Cette coulée distale est probablement une des premières coulées de lave émises lors de l'éruption débutée en 2018. Les roches prélevées sont des fragments de lave de composition basanitique. Les roches sont vitreuses, aphyriques et vesiculées. Certains blocs ont une surface très vitreuse et un cœur microcristallin. À la remontée (et pendant plusieurs jours après) ces fragments explosent sous forme de « popping rocks » dû à la dépressurisation du gaz contenu dans les vésicules. Ce phénomène parfois assez dynamique s'accompagne d'une forte odeur d'œufs pourris suite à l'émission de faible volume d'hydrogène sulfuré contenu dans les vésicules. Ces caractéristiques sont typiques des échantillons prélevés sur le nouveau volcan.

4) Drague DR26 – édifice ancien

La drague DR26 est située sur un petit cône pyroclastique situé à l'est du Fer à Cheval (au nord-est du site de la drague DR13). Les roches prélevées sont des pyroclastes de composition phonolitique riche en phénocristaux de biotite souvent de grande taille (0,4 à 1,1 cm). Ces pyroclastes sont constitués d'une lave très vitreuse de teinte gris-vert, et caractérisés par des niveaux de vésicularité variable. La plupart des échantillons sont des bombes volcaniques de dimensions variables allant de 80 cm à 3 cm (grand axe). Certaines de ces bombes sont entières et plutôt sphériques ou aplaties avec des textures de surface en chou-fleur en croûte de pain. D'autre ont une forme légèrement torsadée et en fuseau, plutôt allongée avec une surface originale préservée tout autour du fragment sauf aux extrémités qui sont fracturées (texture de type « churros ») perpendiculairement aux vésicules tubulaires. Ces fragments pyroclastiques contiennent régulièrement des clastes d'un magma similaire ou de lave mafique (présence d'un fragment sub-arrondi à arrondi porphyrique avec des phénocristaux de pyroxène et olivine et d'un autre gros fragment arrondi de lave aphyrique avec une texture un peu en peau d'oignon). Ces caractéristiques sont typiques d'un volcanisme explosif avec une forte interaction entre magma et eau.

5) Drague DR27 – nouveau volcan

La drague DR27 est située sur une coulée tout au sud sur le nouveau volcan qui a été mise en place entre le 19 mai et le 17 juin 2019. Les échantillons prélevés sont des fragments de lave de composition basanitique. Très similaire à la drague DR 25, ces roches sont vitreuses, aphyriques et majoritairement très vesiculées. Il y avait en effet très peu de fragments denses. Ceci est peut-être dû au fait que cette drague a plutôt échantillonné la partie superficielle de la coulée. À la remontée (et pendant plusieurs jours après) ces fragments explosent sous forme de « popping rocks » du fait d'une dépressurisation rapide du gaz contenu dans les vésicules. Ce phénomène parfois assez dynamique s'accompagne d'une forte odeur d'œufs pourris suite à l'émission de faible volume d'hydrogène sulfuré contenu dans les vésicules. Ces caractéristiques sont typiques des échantillons prélevés sur le nouveau volcan.

6) Drague DR28 – édifice ancien

La drague DR28 est située sur la face nord d'un petit édifice qui s'est construit au centre de la structure d'effondrement du Fer à Cheval dans sa partie Sud-Sud-est, contre la paroi Sud du cratère. Cet édifice est caractérisé, dans sa partie basale de l'ouest au nord-est, par un anneau pyroclastique constitué de dépôts avec des faciès lités de retombées et de déferlantes pyroclastiques issus d'une activité explosive intense qui ont été observés lors de plongées avec la caméra tractée SCAMPI (campagne MAYOBS15, octobre 2020) et observés et échantillonnés lors de plongées avec le ROV VICTOR (campagne GEOFLAMME, Avril-Mai 2021). La drague DR28 révèle cependant que le centre et la partie la plus haute de cet édifice constituent un dôme de lave phonolitique dont la croissance a produit de nombreux fragments anguleux à sub-arrondis de taille très variée centimétrique à décimétrique, et caractérisés par une lave gris sombre, aphyrique et dense, à surface vitreuse. Certains de ces fragments ressemblent à des bombes et des blocs projetés par une activité explosive. Cependant, la plupart sont des fragments de lave produits par une activité effusive (type en coussin) avec une bordure vitreuse épaisse très nette de 1 à 5-8 cm d'épaisseur, et des textures en croûte de pain voire occasionnellement de type cordée. De très rares enclaves mantéliques ont été observées.

Références citées dans le bulletin :

Audru et al. (2006), BATHYMAY : Underwater structure of Mayotte Island revealed by multibeambathymetry / 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

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

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

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-RENASS-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 horizontaland vertical elastic load deformation model derived from GRACE and GNSS station position time series. Journal of Geophysical Research: Solid Earth,123, 3225–3237.https://doi.org/10.1002/2017JB015245

REVOSIMA - IPGP – Octobre 2021

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 soutenu à l'université de la Réunion

Di Muro et al. (2019), rapport interneOVPF-IPGP du 04-04-2019

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

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

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), Melilite-bearing lavas in Mayotte (France): An insight into the mantle source below the Comores. Lithos, Elsevier, 2014, 208-209, 281-297

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.

Shom, 2016. MNT Bathymétrique 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 17983-1785. 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 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

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 5 novembre 2021

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

- *Le site de l'IPGP dédié : http://www.ipgp.fr/fr/decouverte-de-naissance-dun-nouveau- volcan-marin-a-lest-de-mayotte*
  http://www.ipgp.fr/fr/essaim-simique-a-lest-de-mayotte-mai-juin-2018

Contacter le BRGM : http://www.brgm.fr/content/contact

- *Direction Risques et Prévention / Unité Risques sismique et volcanique*
  Direction des Actions Territoriales / Direction régionale de Mayotte
  Contacter le BRGM : http://www.brgm.fr/content/contact
- *Le site du BRGM :*
  http://www.brgm.fr/content/essaim-seismes-mayotte-faq-scientifique?pk_campaign=twitter&pk_kwd=2018- 06_seismes-mayotte-faq
- *Le site de l'IFREMER : https://wwz.ifremer.fr/Espace-Presse/Communiques-de-presse/Seismes-a-Mayotte-conclusions-de-la-seconde-campagne-oceanographique*
- *Le site de l'ENS : http://volcano.iterre.fr/mayotte-seismo-volcanic-crisis*
- *Le site du bureau central sismologique français (BCSF-RENASS) :http://www.franceseisme.fr/*

REVOSIMA - IPGP – Octobre 2021

- *Le site du Réseau national de surveillance sismologique RENASS : https://renass.unistra.fr/*
- *Le site de GEOSCOPE : http://geoscope.ipgp.fr/index.php/fr/actualites/actualite-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 : http://www.franceseisme.fr/

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'IPGS 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 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 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, IPGS et Université de Strasbourg, Université Grenoble Alpes et 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.