



Bulletin n°4 du 1 au 15 septembre 2019

Bulletin de l'activité sismo-volcanique à Mayotte

Préambule

Evolution au cours des derniers quinze jours :

Pas d'évolution notable, activité sismique principale toujours concentrée à 5-15 km de Petite-Terre, à des profondeurs de 19-56 km malgré une légère baisse de l'énergie sismique libérée. Une sismicité plus faible en nombre et en énergie (faible magnitude comprise entre 1 et 3), est également toujours enregistrée proche de Petite-Terre à environ 5 km à l'est (à des profondeurs de 20-50 km) voire sous Petite Terre. Cette sismicité était déjà visible sur les données des sismomètres fond de mer depuis février 2019.

Les déplacements de surface mesurés depuis le début de la crise par les stations GPS de Mayotte indiquent : a) un déplacement d'ensemble des stations GPS de Mayotte vers l'est d'env. 17 à 20 cm ; b) un affaissement (subsidence) d'env. 8 à 15 cm selon leur localisation sur l'île. Un ralentissement des déplacements est observé depuis avril-mai 2019 ainsi qu'une stabilisation de la subsidence depuis 1 mois sur certaines stations.

Événement en cours : éruption sous-marine en cours en date du 31 juillet 2019, à 50-60 km à l'Est de Mayotte avec sismicité et déformations associées.

Il est fondamental de reporter tout séisme ressenti au BCSF-RENASS sur le site :

<http://www.franceseisme.fr/>

Nouveau site éruptif sous-marin à l'Est de Mayotte découvert lors des campagnes océanographiques (IFREMER Mayobs-1-2-3-4) réalisées entre le 2 mai et le 30 juillet 2019.

Edifice principal : latitude : $-12^{\circ}54'$; longitude : $45^{\circ}43'$; hauteur : au moins 800 m (en date du 31 juillet 2019) ; profondeur à la base du site éruptif : -3500 m

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

Veille scientifique renforcée.



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.

Ce réseau est opéré par l'IPGP avec l'appui du BRGM Mayotte. Le REVOSIMA bénéficie du soutien de l'Observatoire Volcanologique du Piton de la Fournaise (OVPF-IPGP), de l'IFREMER, du CNRS-INSU et du BRGM. Les données de ce réseau sont produites par un large consortium de partenaires scientifiques (voir liste en fin de bulletin) 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 publié 2 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) et par les Services Nationaux d'Observations du CNRS-INSU. Les données GPS sont distribuées par l'Institut Géographique National (IGN). 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.

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 néphéline et de téphrite, 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 150000 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., en révision).

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., en révision). 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 principal, et à 25 km à l'est de Petite-Terre pour le secondaire, à des profondeurs comprises entre 25 et 50 km dont les localisations ont pu être affinées grâce aux relocalisations effectuées lors des campagnes en mer (MD220-MAYOBS-1, MD221-MAYOBS-2,

MD222-MAYOBS-3, MD223-MAYOBS-4). 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-RéNaSS juillet 2018*). Depuis juillet 2018 et la fin de la première phase intense de l'éruption, le nombre de séismes a diminué mais une sismicité continue persiste, fluctuante mais qui pu généré jusqu'à plusieurs séismes de magnitudes proches de M_4 ressentis par mois. Du 1 au 15 septembre 2019 la sismicité est restée similaire (nombre et localisation) à celle enregistrée lors de la période du 16 au 31 août 2019 malgré une légère baisse de l'énergie sismique libérée.

3. Les déplacements de surface mesurés depuis le début de la crise par les stations GPS de Mayotte indiquent : a) un déplacement d'ensemble des stations GPS de Mayotte vers l'est d'env. 17 à 20 cm ; b) un affaissement (subsidence) d'env. 8 à 15 cm selon leur localisation sur l'île. Un ralentissement des déplacements est observé depuis avril-mai 2019. Sur le dernier mois, l'affaissement (subsidence) semble même s'être stabilisé sur certaines stations, ce paramètre sera à suivre et à confirmer dans le futur. Les premières modélisations simples, utilisant une source unique isotrope localisée en un point, montrent que ces déplacements 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*). Pour les 3 derniers mois, le meilleur modèle simple (modèle à une source, milieu isotrope et élastique) pouvant rendre compte de ces déplacements serait une source en déflation localisée entre 40 et 80 km à l'est Mayotte et à une profondeur comprise entre 20 et 35 km à 95% de probabilité. Des modèles plus complexes en cours d'évaluation suggèrent que plusieurs sources de pression, de géométrie et volume variable, localisées à différentes profondeurs, pourraient également expliquer les déformations observées sur les périodes d'observations. Quelques soient les modèles, ceci suggère que des transferts de fluides magmatiques en profondeur se poursuivent en même temps que continue l'émission de lave sous-marine à environ 50 km à l'est de Mayotte selon les dernières observations des campagnes océanographiques en date du 31 juillet 2019.

4. Du 2 au 18 mai 2019, une campagne océanographique (MD220-MAYOBS-1) 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'environ 820 m de hauteur sur le plancher océanique situé à 3500m de profondeur d'eau. Les campagnes (MD221-MAYOBS-2 - 10-17 juin 2019 ; MD222-MAYOBS-3 - 13-14 juillet 2019 ; et MD223-MAYOBS-4 - 19-31 juillet 2019) ont mis en évidence de nouvelles coulées de lave, au sud et à l'ouest du nouveau site éruptif, laissant supposer la présence de plusieurs sorties de lave dans la région du nouveau site éruptif. Des panaches acoustiques (700 à 1000 m de haut ; dont la nature hydrothermale et/ou magmatique reste à préciser) ont été détectés dans la colonne d'eau au-dessus de la nouvelle coulée de lave de juin-juillet 2019, ainsi qu'au-dessus de la structure volcanique ancienne située à l'aplomb de la zone de l'essaim sismique principal (5-15 km à l'est de Petite-Terre).

5. En l'état actuel des connaissances, le nouveau site éruptif a produit au moins 5 km^3 de lave depuis le début de son édification. Sur une période de 11 mois (de juillet 2018 - début des déformations de surface enregistrées à Mayotte - à juin 2019), le flux éruptif de lave est au minimum d'environ $150\text{-}200 \text{ m}^3/\text{s}$. Les points de sorties distants ont produit environ $0,2 \text{ km}^3$ de lave en 28 jours (18 mai-17 juin 2019) pour un flux minimum moyen de l'ordre de $80 \text{ m}^3/\text{s}$. Entre le 17 juin et le 30 juillet 2019 le flux éruptif est estimé également de l'ordre de $80 \text{ m}^3/\text{s}$ ($0,3 \text{ km}^3$). Ces volumes et flux éruptifs sont exceptionnels et sont, malgré les incertitudes, parmi les plus élevés observés depuis l'éruption du Laki (Islande) en 1783.

6. Des dégagements gazeux importants d'origine magmatique (majoritairement CO_2) et de faible température sont connus depuis de nombreuses années (au moins depuis 1998) sur la plage de l'aéroport (sud Petite-Terre). Une campagne de mesure des émissions de gaz par le sol et

d'échantillonnage des fluides a eu lieu du 7 au 14 septembre 2019. Les analyses in-situ ont permis de vérifier la composition des émissions signalées par la population. La température des émissions sur le platier de la plage à l'est de l'aéroport est toujours proche de celle de l'eau de mer. Ces émissions gazeuses sont caractérisées par une composition assez stable dans le temps et qui est dominée par le CO₂, avec des traces de CH₄, CO, H₂S et He. Le H₂S a été identifié a priori pour la première fois (à confirmer) en septembre 2019 et seulement dans les émissions avec le flux le plus important, situées dans le secteur le plus éloigné de la côte sur le platier de la plage à l'est de l'aéroport. Les données disponibles depuis 2005 suggèrent que l'évolution spatiale et temporelle des émissions dans le platier est faible. Environ 200 mesures de flux de CO₂ par le sol ont été réalisées en septembre 2019. Les données disponibles indiquent que la zone d'émission de la plage de l'aéroport se poursuit à terre sur une direction parallèle à celle des cônes basaltiques, mais avec des flux rapidement décroissants avec la distance du platier. Les flux les plus élevés à terre restent modestes, ils sont jusqu'à 2 ordres de grandeur plus faibles que ceux mesurés sur le platier de la plage de l'aéroport. Les nouveaux sites de mesures identifiés, suite aux inondations générées par les grandes marées le 1^{er} septembre, au nord-est et juxtaposant la piste de l'aéroport, montrent des flux de CO₂ parmi les plus faibles sur Petite-Terre.

7. Six stations électromagnétiques Magnéto-Télluriques ont été déployées sur Petite-Terre (deux stations) et dans son lagon (quatre stations) en mai 2019 afin de cartographier la structure électrique de l'île. Le traitement préliminaire des données a permis de mettre en évidence un conducteur électrique en surface (<1 km) très probablement associé à une zone d'altération hydrothermale. Il a également permis de mettre en évidence un conducteur à grande profondeur (>20 km) qui pourrait s'expliquer par la présence d'un réservoir magmatique.

8. Les réseaux de GPS (temps réel) et des sismomètres (à terre – temps réel ; et en mer – relevé mensuellement) ont été renforcés depuis début 2019. 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).

10. Les analyses de l'ensemble des laves draguées lors des campagnes océanographiques MD220-MAYOBS-1, MD221-MAYOBS-2 et MD223-MAYOBS-4, 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, appartiennent à une série magmatique modérément à faiblement alcaline, caractéristique du volcanisme du nord de Mayotte. Elles montrent une variété compositionnelle, depuis les basanites (MAYOBS-4-DR09) jusqu'aux phonolites (MAYOBS-1-DR02, MAYOBS-2-DR07), 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 (MAYOBS-1-DR01, MAYOBS-4-DR10 et DR12), ou des coulées émises entre mai et juin 2019 (MAYOBS-2-DR08) et entre juin et juillet 2019 (MAYOBS-4-DR11, à l'exception d'un échantillon plus primitif dont l'origine doit encore être précisée).

9. L'analyse de toutes les données acquises récemment nécessite des travaux approfondis pour améliorer l'évaluation des aléas et des risques induits (sismique, volcanique, tsunami) pour Mayotte. Le programme d'étude sera alors 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 cadre du suivi de l'essaim sismique de Mayotte qu'il a assuré depuis cette date. Désormais, le Réseau de Surveillance Volcanologique Sismologique de Mayotte (REVOSIMA) publiera un bulletin de l'activité 2 fois par mois.

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 se référer au bulletin n° 1 du 23 août 2019 (http://www.ipgp.fr/sites/default/files/190823_1er_bulletin_info_sismo_volcanique_mayotte.pdf)

Entre le 1 et le 15 septembre 2019, le Réseau Volcanologique Sismologique de Mayotte (REVOSIMA) a détecté, avec le réseau de stations terrestres, un total de 506 séismes (voir **Figures 1, 2, 3, 4**) de magnitude $M \geq 0,9$ entre Mayotte et le nouveau site éruptif à 50 km au sud-est de Mayotte. Au total, 270 séismes ont pu être localisés (voir Figure 4) dont 146 de magnitude M2 à M3.

Ramené à des valeurs moyennes quotidiennes on note, entre le 1 et le 15 septembre, une moyenne de 18 séismes par jour, dont 10 séismes/j de magnitude $\geq M2$ et seulement 1 séisme/jour de magnitude $\geq M3$. Si en nombre la sismicité est similaire à la période allant du 15 au 31 août (Bulletin N°3), ces chiffres montrent une légère baisse de l'énergie sismique libérée cohérente avec la variabilité de la sismicité et les incertitudes dans les localisations et calcul de magnitude.

- 157 séismes volcano-tectoniques (séisme à haute fréquence) de magnitude $M > 2$ localisés entre 5 et 15 km à l'est de Petite-Terre à une profondeur comprise entre 19 et 56 km (voir **Figures 1, 2, 3, 4**) dont 11 séismes de magnitude $M \geq 3$ et aucun (0) séisme d'une magnitude $M \geq 4$ (voir **Tableaux 1, 2**).
- **Comme indiqué en fin de bulletin, il est fondamental de reporter tout séisme ressenti au BCSF-RENASS sur le site : <http://www.franceseisme.fr/>**
- Le REVOSIMA enregistre toujours des signaux sismiques de type très longue période VLP (très basse fréquence, entre 5 et 100 secondes) similaires notamment à l'évènement enregistré le 11 novembre 2018. Ce sont des signaux sismiques habituellement associés dans la littérature à des résonances et des mouvements de fluide (magmatique ou hydrothermal). Ils restent difficiles à localiser et analyser et font l'objet d'une étude spécifique en cours (A. Laurent, IPGP). Les 84 séismes VLP similaires enregistrés entre février et avril 2019 avaient été localisés à une dizaine de kilomètres à l'Est de Petite Terre dans la zone de l'essaim sismique le plus actif (*Feuillet et al., Nature, en révision*).
- 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 24 et 82 km de profondeur. Cela est confirmé après les relevés réguliers des OBS, notamment lors du relevé effectué lors de la campagne MD222-Mayobs3.

Période du : 1 au 15 septembre 2019 (15 jours)	
Sismicité enregistrée par le réseau terrestre et validée et localisée, excluant les détections automatiques	
(en gris les chiffres pour la période du 15 au 31 août détectés selon le même protocole)	
Classe de magnitude	Nombre de Séismes VT
M < 1,0	1 (0)
M1,0 à M2,0	112 (79)
M2,0 à M3,0	146 (240)
M3,0 à M4,0	11 (32)
M4,0 à M5,0	0 (1)
M5,0 à M6,0	0 (0)
M1,0-M6,0	270 (353)
M >= 2,0	157 (273)

Tableau 1 : Répartition des séismes volcano-tectoniques (VT) enregistrés par le réseau terrestre par classe de magnitude du 1 au 15 septembre 2019.

Total séismes >= M3,5	Dont M >= 4,0	Dont M >= 4,5	Dont M >= 5,0	Dont M >= 5,5
1998	551	149	32	2

Tableau 2 : Comptage des séismes localisés de magnitude M>3,5 du 10 mai 2018 au 15 septembre 2019 par classe de magnitude (base de données BRGM et REVOSIMA).

- Si l'activité sismique reste globalement stable sur les dernières 6 semaines (**Figures 1, 2, 3**), elle est néanmoins importante, et témoigne d'une activité volcanique toujours intense. 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 séismes de magnitude M5 du 15 juin et M4,9 du 30 août dernier
- A noter que plusieurs séismes « proches » de très faible à faible magnitude (1,3-1,8) ont été enregistrés entre le 1 et le 15 septembre 2019 entre l'essai sismique principal et Petite-Terre, voire même sous Petite Terre (**Figure 4**). Le traitement des données OBS montre que ces séismes de faible magnitude sont présents depuis le début des enregistrements OBS.

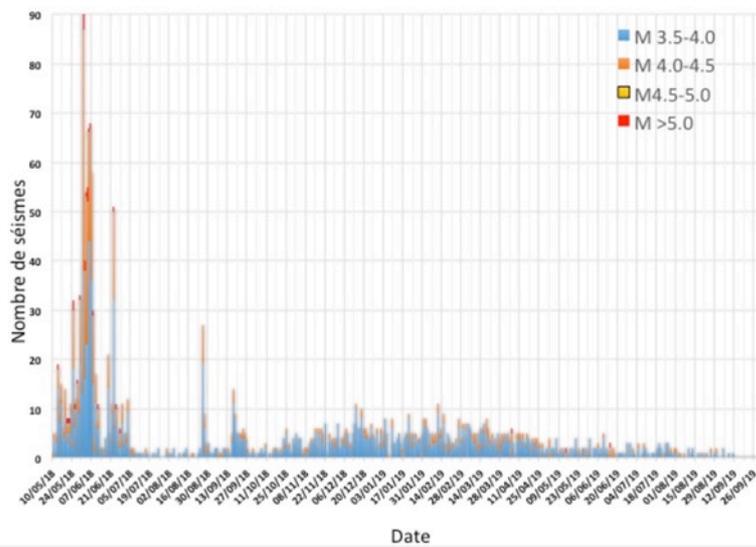


Figure 1 : Comptage par jour et magnitude de l'activité sismique depuis le 10 mai 2018 (Bertil et al., 2019) (© OVPF-IPGP et BRGM).

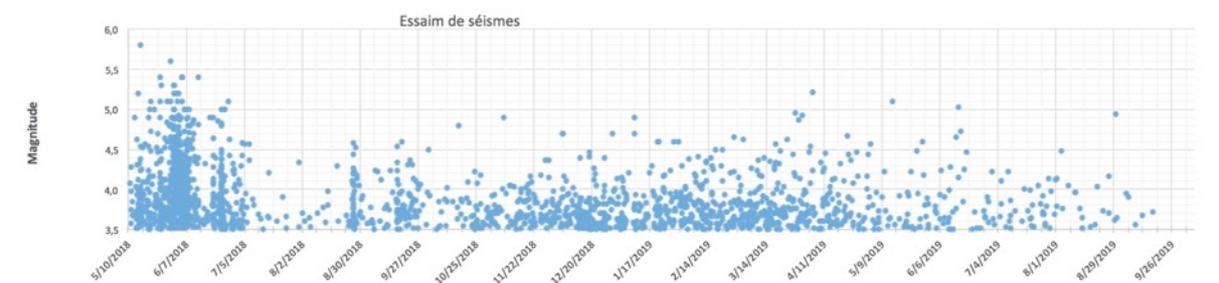


Figure 2 : Suivi de l'activité sismique en cours : magnitude des séismes en fonction du temps depuis le 10 mai 2018 (Bertil et al., 2019) (© OVPF-IPGP et BRGM).



Figure 3 : Moment sismique cumulé en Newton-mètre (représentant le cumul de l'énergie dissipée par l'ensemble des séismes) depuis le début de l'activité sismique en cours le 10 mai 2018 (Bertil et al., 2019) (© OVPF-IPGP et BRGM).

Localisation

Il n'y a pas eu d'évolution spatiale notable de la localisation de la sismicité entre le 1 et le 15 septembre 2019 par rapport au bulletin précédent.

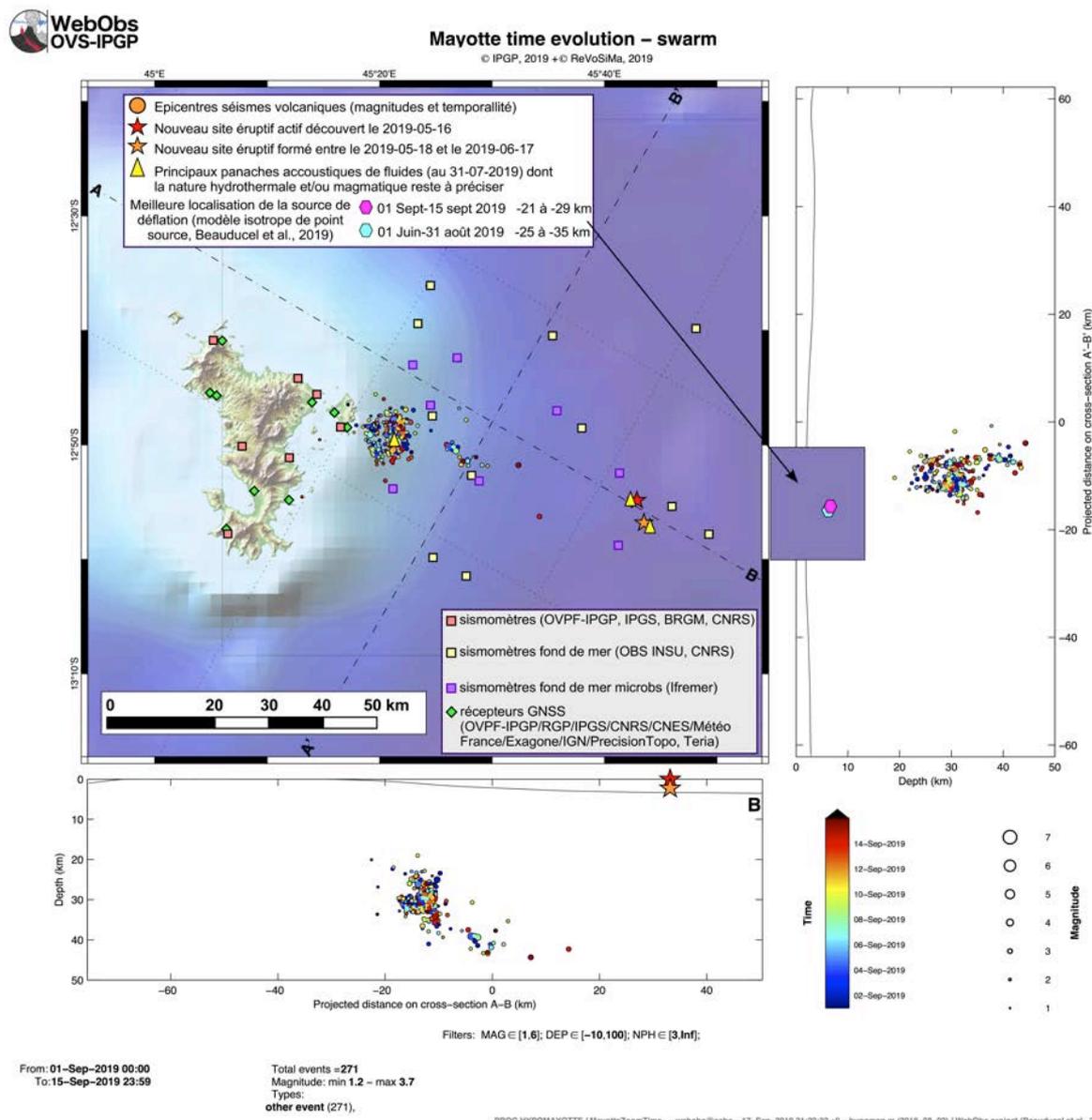


Figure 4 : Carte de localisation des épicentres (± 5 km) des séismes volcano-tectoniques avec les réseaux sismiques à terre (IPGP-IFREMER-CNRS-BRGM-BCSF-RéNaSS, IPGS) entre le 1 et le 15 septembre 2019 (15 jours) (échelle temporelle de couleur) et coupes transverses et axiales le long de la ride montrant la localisation estimée en profondeur (précision variant entre ± 5 km et ± 15 km) des séismes en fonction de la magnitude (taille des symboles). La localisation approximative des panaches acoustiques identifiés pendant les campagnes océanographiques IFREMER (MD220-Mayobs-1, MD221-Mayobs-2, MD222-Mayobs-3, MD223-Mayobs-4) 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, et l'étoile orange le deuxième site éruptif identifié le 17 juin 2019. La position des meilleurs modèles de source en déflation (dégonflement) issues des modélisations (modèle isotrope point source) sur des périodes de temps choisis est indiquée par des polygones de couleur (rose : 2019-06-15/2019-09-15 ; bleu : 2019-06-01/2019-08-31) avec la profondeur en km associée. A noter que la source n'a pas bougé en latitude et longitude sur la période du 1 au 16 septembre 2019. Cette source simple et unique en déflation permet de reproduire l'essentiel des déplacements horizontaux et verticaux enregistrés sur Mayotte depuis juillet 2018 (voir Figure 7). Les stations sismiques du réseau terrestre, les sismomètres fond de mer (OBS) et les stations de positionnement par satellite GPS sont indiquées par des symboles (voir légende) © OVPF-IPGP, BRGM, IFREMER, CNRS, BCSF-RéNaSS, IPGS).

Déformation

Sont considérés 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 Géographique National (IGN),
- les nouvelles stations installées à Mayotte et à Grande Glorieuse dans le cadre du nouveau réseau de surveillance financé par l'Etat,
- la station DSUA (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., en révision ; Feuillet et al., en révision*) un déplacement d'ensemble de l'île vers l'est et un affaissement (**Figures 5 et 6**). En cumulé depuis le début de la crise ces déplacements horizontaux sont d'environ 17 à 20 cm, et l'affaissement (subsidence) d'environ 8 à 15 cm suivant les sites (**Figure 5**). A noter que depuis les mois d'avril-mai 2019 un ralentissement des déplacements est observé. *Sur le dernier mois, l'affaissement (subsidence) semble même s'être stabilisé sur certaines stations, ce paramètre sera à suivre et à confirmer dans le futur (Figure 6)*. Des calculs automatiques et journaliers ont été mis en place à l'IPGP (via les logiciels GipsyX et Webobs) afin de suivre ces déplacements, et modéliser une source de déformation en temps-réel. Les caractéristiques de la source (localisation, profondeur et variation de volume), ajustant au mieux les observations sur une période de temps considérée, sont modélisées par un point source isotrope en profondeur (modèle simple à mettre en œuvre). Les couleurs correspondent à la probabilité d'existence de la source dans l'espace (vue de dessus et en profils ; **Figure 7**).

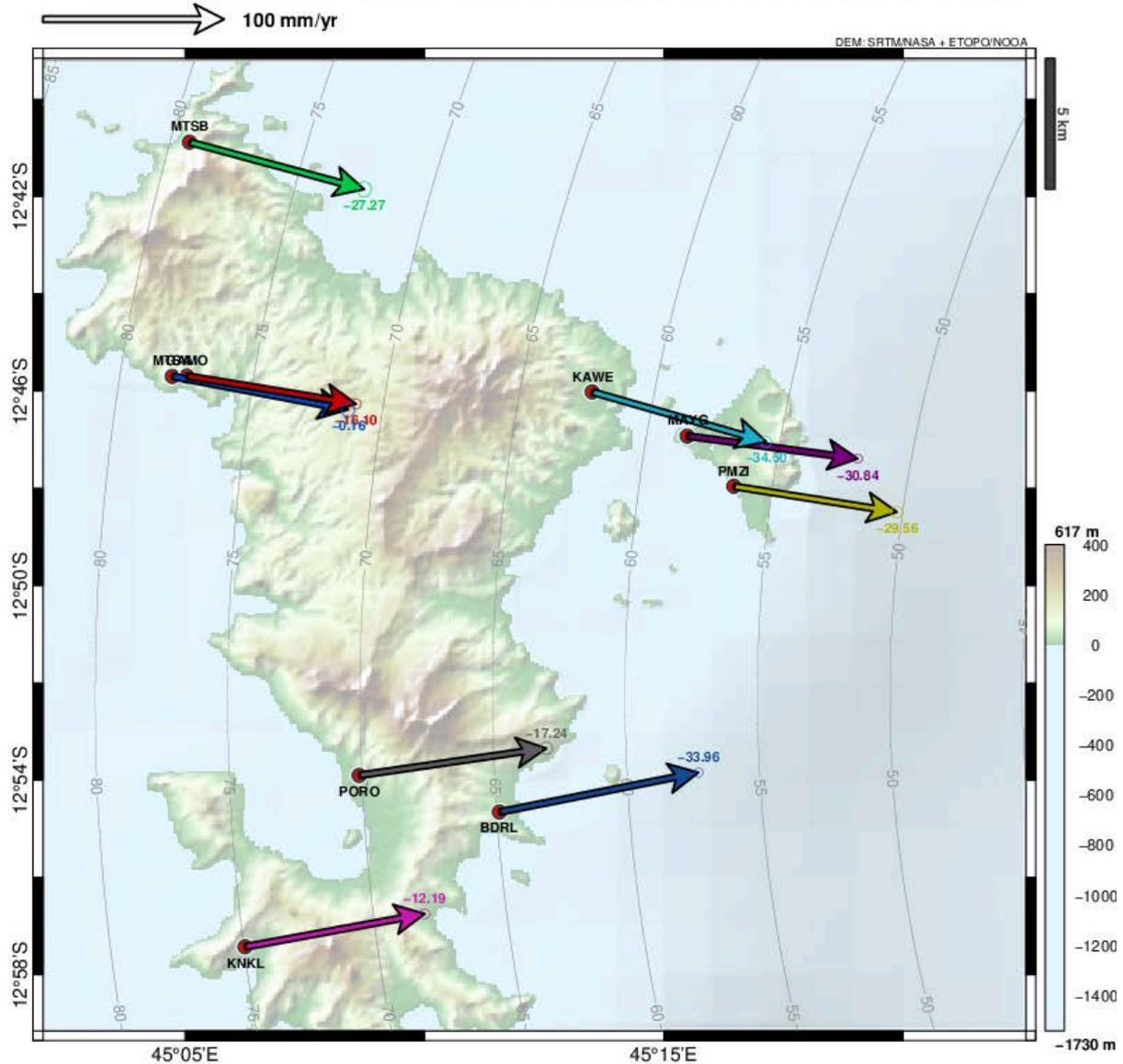
Ainsi pour les 3 derniers mois, le meilleur modèle simple (modèle à une source, milieu isotrope et élastique) pouvant rendre compte de ces déplacements serait une source en déflation localisée entre 40 et 80 km à l'est Mayotte et à une profondeur comprise entre 20 et 35 km à 95% de probabilité (**Figure 7**). Comparativement au début de la crise, et si l'on considère une source unique celle-ci semble être de plus en plus superficielle depuis début juillet avec des volumes impliquées plus faibles ($-100 \text{ m}^3/\text{s}$; **Figure 7**).

Des modèles plus complexes, en cours d'évaluation, suggèrent que plusieurs sources de pression (en déflation et en inflation), de géométrie et de volume variable, localisées à différentes profondeurs, pourraient également expliquer les déformations observées sur différentes périodes de temps. Néanmoins la source dominante reste une source en déflation. Quelques soient les modèles, ces déformations confirment que des transferts de fluides magmatiques se poursuivent toujours en profondeur, et qu'en l'état de l'art actuel ces fluides semblent circuler entre 20 et 60 km de profondeur sans que l'on puisse élaborer de scénarios plus affinés sur l'évolution à terme de cette activité.



GNSS Mayotte GipsyX – Velocity vectors

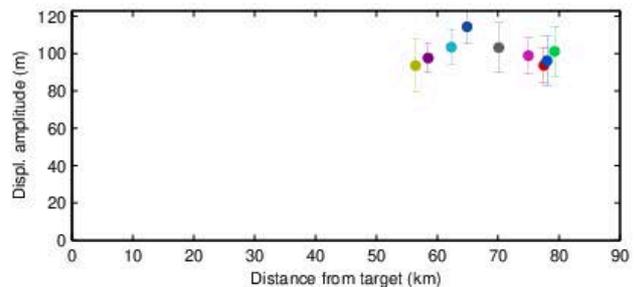
Request by Aline Peltier [AP] © OVPF/IPGP/ReVoSiMa, 2019 + © RGP/IPGS/INSU//CNES/MeteoFrance/Exagone/PrecisionTopo, 2019



Referential: ITRF08
 E +0 mm/yr
 N +0 mm/yr
 U +0 mm/yr

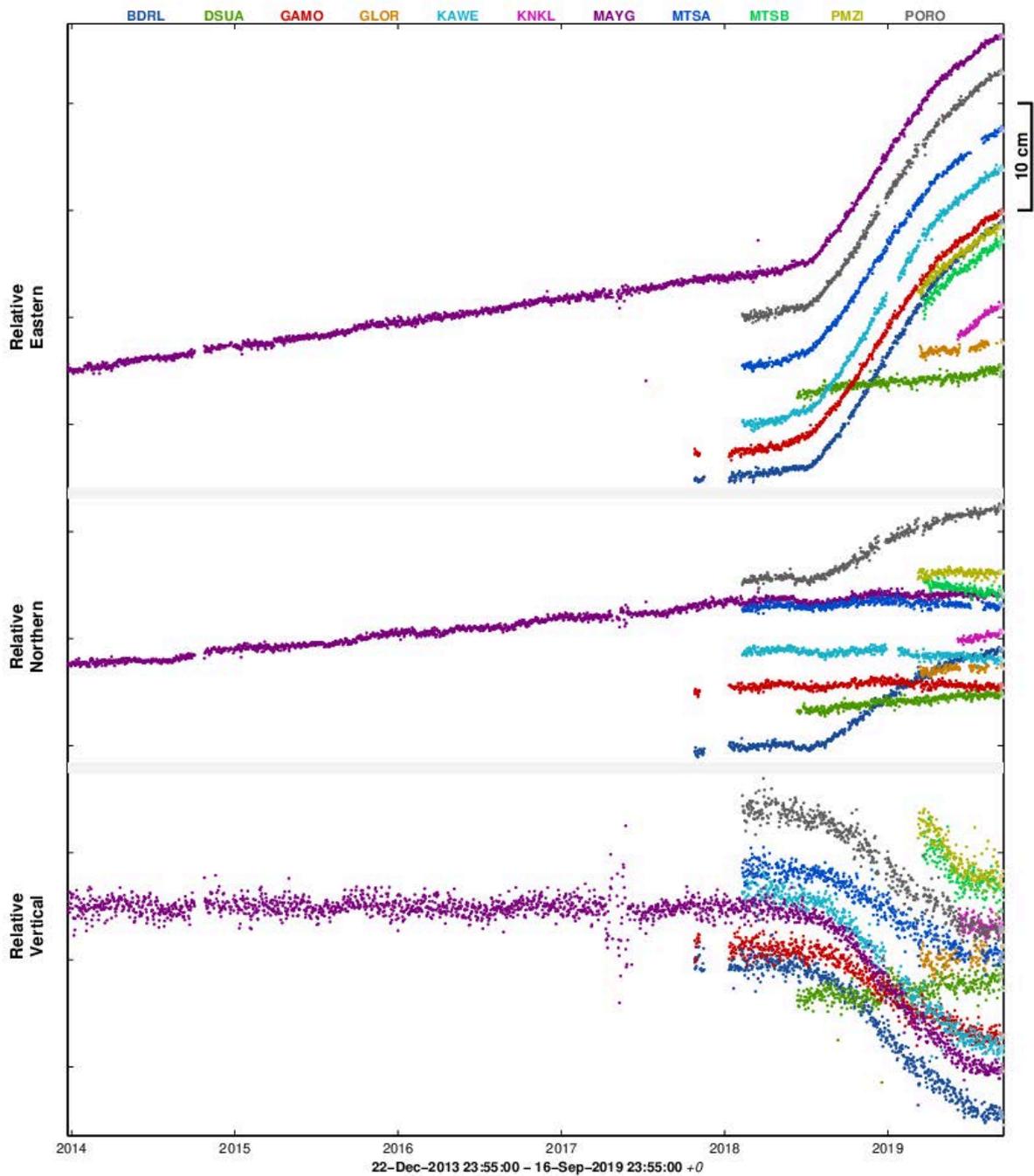
Mean velocity (ITRF08):
 East = +116.66 mm/yr
 North = +9.44 mm/yr
 Up = -23.35 mm/yr

Velocity ref. vector (fixed):
 East = +21.20 mm/yr
 North = +14.40 mm/yr
 Up = +0.00 mm/yr



PROC.GIPSYXMAOTTE / VECTORS_ - webobs@saba - 17-Sep-2019 11:15:29 +0 - gnss.m (2019-09-09) / WebObs project (Beauducel et al., 2001-2019)

Figure 5 : Déplacements du sol enregistrés sur les stations GPS de Mayotte au cours des 3 derniers mois du 15-06-2019 au 15-09-2019. 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 et BRGM).



Referential: ITRF08
E +0 mm/yr
N +0 mm/yr
U +0 mm/yr

PROC.GIPSYXMAYOTTE / all - webobs@saba - 17-Sep-2019 11:16:25 +0 - gnss.m (2019-09-09) / WebObs project (Beauducel et al., 2001-2019)

Figure 6 : 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 1 station au nord de Madagascar à Diego Suarez (DSUA) sur les composantes est (en haut), nord (au milieu) et vertical (en bas) entre avril 2018 et le 15 septembre 2019, et pour la station MAYG avec des données datant de décembre 2013 pour visualiser une longue série temporelle anté-crise. Post-traitement de ces données réalisé par l'IPGP (©OVPF-IPGP et BRGM).



GNSS Mayotte GipsyX – Source modelling

© OVPF/IPGP/ReVoSiMa, 2019 + © RGP/IPGS/INSU//CNES/MeteoFrance/Exagone/PrecisionTopo, 2019

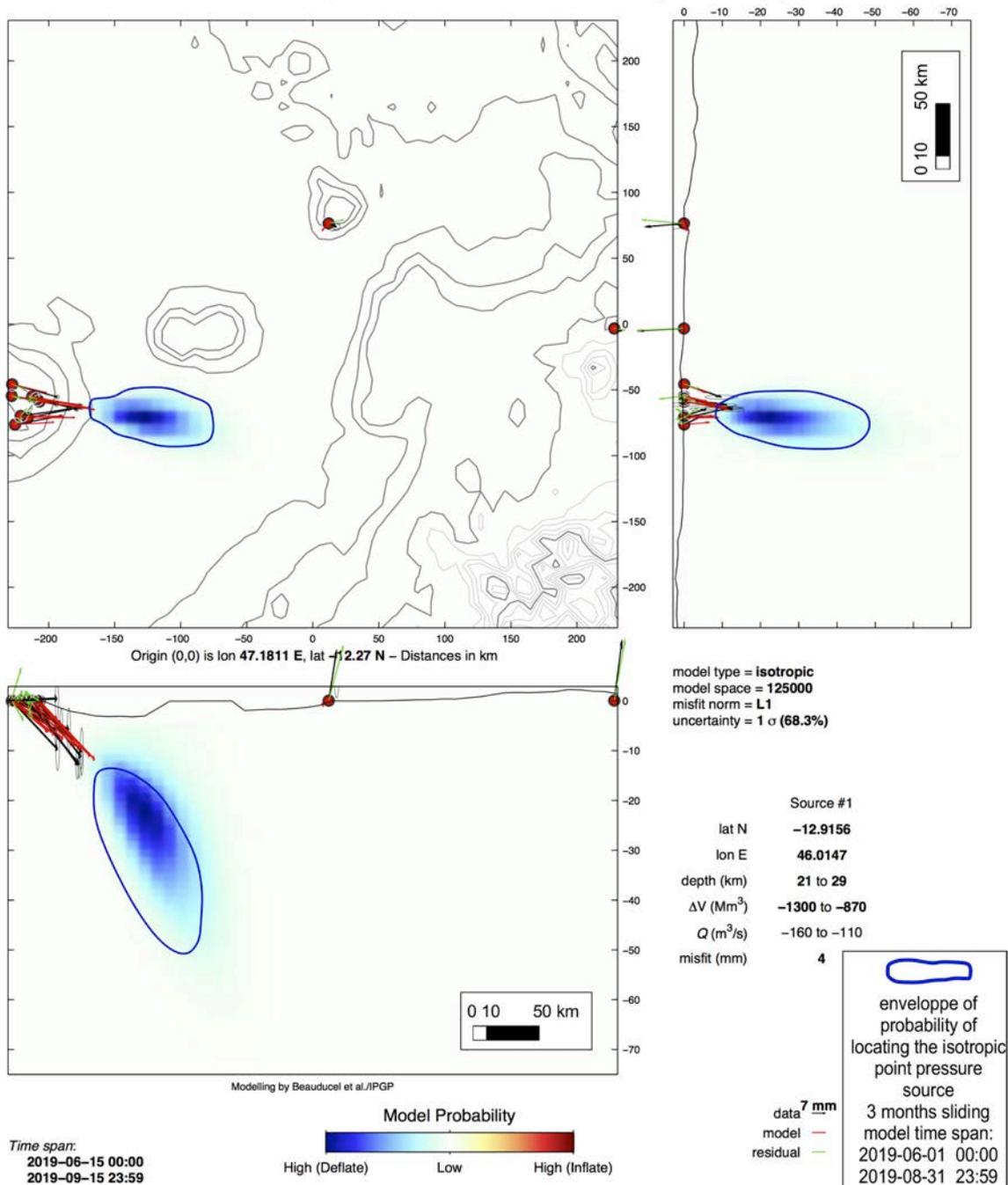


Figure 7 : Localisation de la source modélisée (meilleur modèle issu d'une modélisation de type isotrope point source) potentiellement à l'origine des déplacements enregistrés, au cours de 2 périodes de 3 mois : 1 juin-31 août 2019 (trait bleu) et 15 juin-15 septembre 2019 (zone de pixels colorés), sur les stations GPS de Mayotte, Grande Glorieuse et DSUA (Madagascar). Les vecteurs en noirs représentent les données observées, les vecteurs en rouge représentent les données modélisées, et les vecteurs en vert représentent les résidus du signal qui n'ont pas pu être modélisés. L'échelle de couleur donne la probabilité en % de la localisation d'une source en déflation (dégradé de couleurs froides, bleus) ou en inflation (dégradé de couleurs chaudes, jaune-rouge) en latitude-longitude et en profondeur selon une représentation cartographique et en coupes verticales orientées est-ouest et nord-sud. Le modèle permet d'estimer la variation de volume de la source, en millions de m³ (Mm³) et son incertitude, qui explique au mieux les signaux enregistrés. En faisant l'hypothèse que cette variation de volume traduit des transferts de magma dans la lithosphère, le modèle permet d'avoir une estimation préliminaire du flux en m³/s de magma associé à la déflation. Modélisations réalisées par F. Beauducel (IPGP/IRD) et OVPF-IPGP (©OVPF-IPGP et BRGM).

Géochimie des fluides

• A Terre :

Une campagne de mesure des émissions de gaz par le sol et d'échantillonnage des fluides a eu lieu du 7 au 14 septembre 2019. Les analyses in-situ ont permis de vérifier la composition des émissions signalées par la population et d'identifier celles avec une composition très proche de l'air (**Figure 8**). Deux nouveaux secteurs d'émissions (Lac Dziani – avec une possible composition organique et l'aéroport) ont été identifiés et leur étude est en cours. Le secteur principal d'émissions de gaz riches en CO₂ est celui dit de « La plage de l'aéroport » (**Figure 8**) (pour des informations complémentaires sur les dégazages, voir REVOSIMA Bulletin n°1 du 23 août 2019).

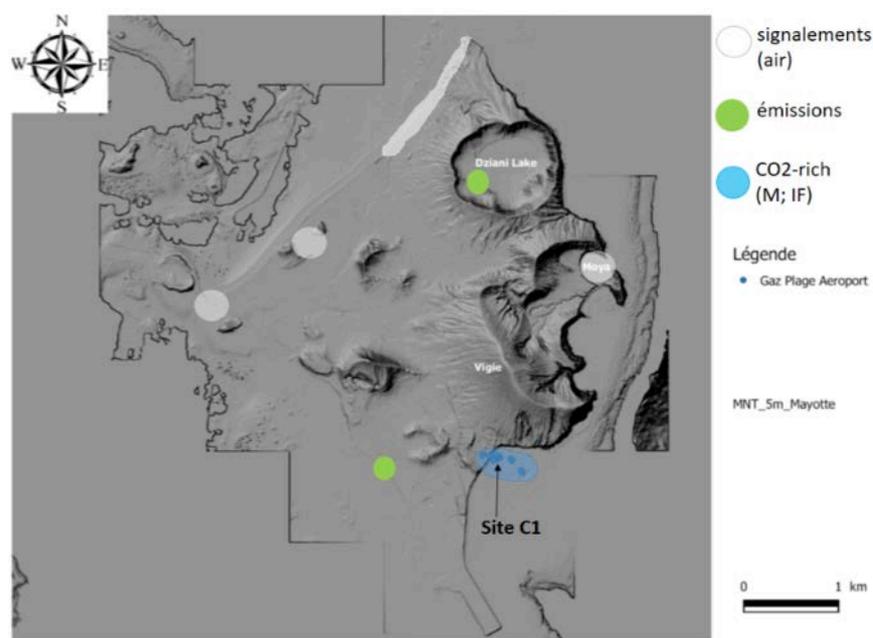


Figure 8 : Distribution spatiale des émissions de fluides par le sol signalées ou observées sur Petite Terre (Mayotte).

Les missions effectuées entre décembre 2018 et septembre 2019 ont permis de cartographier la distribution spatiale des centaines de points d'émissions situés sur le plateau de « La plage de l'aéroport » et de repérer des points à flux élevé déjà analysés en 2005 et 2008 par le BRGM (Traineau et al., 2006 ; Sanjuan et al., 2008). Ces points (ex C1 ; **Figure 8**) vont être ré-échantillonnés régulièrement lors des prochaines missions pour un suivi régulier de leur évolution temporelle. La température des émissions sur le plateau est toujours proche de celle de l'eau de mer et évolue avec l'épaisseur de la lame d'eau (30-25°C en septembre 2019).

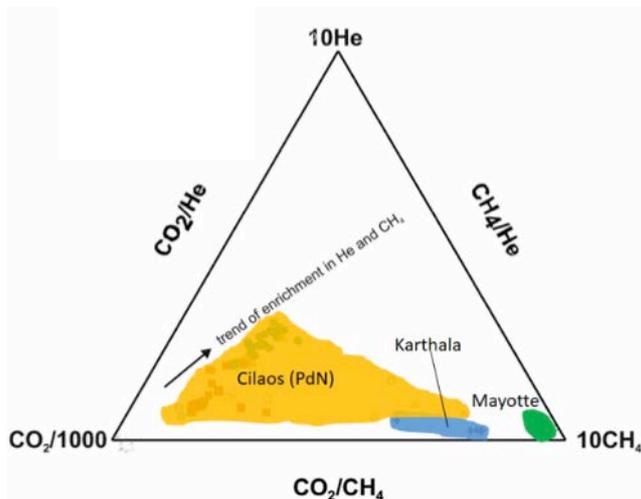
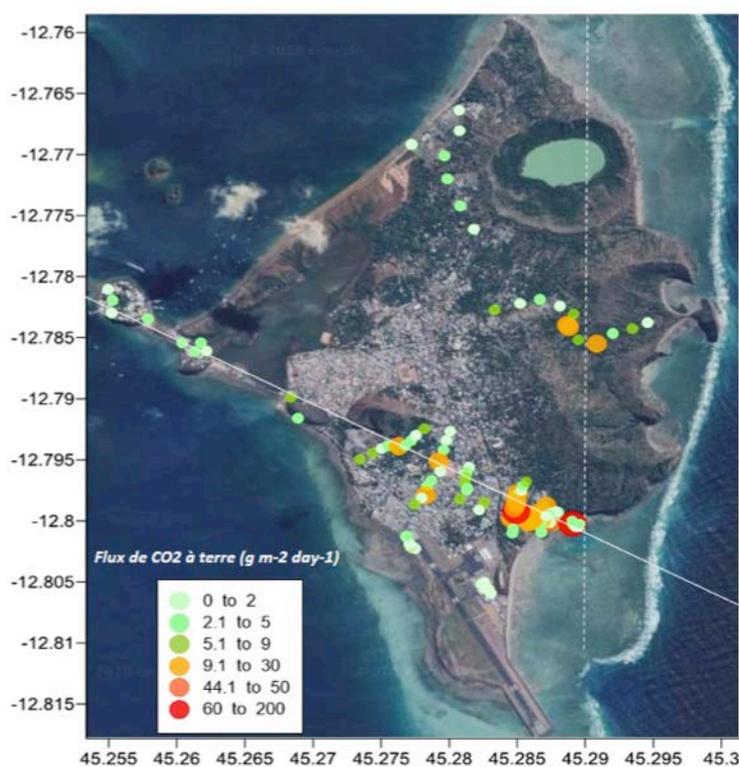


Figure 9 : Composition des émissions de gaz des sources hydrothermales avec des composantes d'origine magmatiques (e.g. CO₂, CO) dans le secteur de « La Plage de l'Aéroport » de 2005 à 2019 et comparaison avec les compositions des i) émissions fumeroliennes au sommet du volcan Karthala (Grande Comore) et ii) de la phase gazeuse associée avec les sources thermales de Cilaos (Piton des Neiges – PdN ; La Réunion) sont reportées (Di Muro et al., étude en cours).

Ces émissions gazeuses sont caractérisées par une composition assez stable dans le temps et qui est dominée par le CO₂, avec des traces de CH₄, CO, H₂S et He. Le H₂S a été identifié a priori pour la première fois en septembre 2019 et seulement dans les émissions avec le flux le plus important, situées dans le secteur le plus éloigné de la côte. Il n'est pas exclu qu'il ait été présent auparavant mais qu'il soit dissout dans les sites à faible débit en contact avec de l'eau et donc pas détecté par le passé. Les données disponibles depuis 2005 suggèrent que l'évolution spatiale et temporelle des émissions dans le platier est faible (**Figure 9**) et qu'elle est, au moins en partie, déterminée par le degré variable d'interaction gaz-eau (e.g. dissolution partielle du H₂S et du CO₂, fractionnement isotopique du C dans les points d'émission ayant un flux plus faible).

Environ 200 mesures de flux de CO₂ par le sol ont été réalisées en septembre 2019 (méthode de



la chambre d'accumulation) selon des profils avec un pas variable entre 3 et 200 mètres (**Figure 10**). Les profils ont été mesurés orthogonaux aux deux alignements principaux de cônes éruptifs (cônes basaltiques SE-NW, ligne blanche ; cônes phonolitiques ; N-S, ligne en pointillés blancs). Les données disponibles indiquent que la zone d'émission de la plage de l'aéroport se poursuit à terre sur une direction parallèle à celle des cônes basaltiques, mais avec des flux rapidement décroissants avec la distance du platier. On remarquera que les flux les plus élevés à terre restent modestes et qu'ils sont jusqu'à 2 ordres de grandeur plus faibles que ceux mesurés sur le platier de la plage de l'aéroport. Les nouveaux sites de mesures identifiés, suite aux inondations générées par les grandes marées le

1^{er} septembre, au nord-est et juxtaposant la piste de l'aéroport, montrent des flux de CO₂ parmi les plus faibles (points verts, **Figure 10**) sur Petite-Terre.

Figure 10 : Distribution spatiale des émissions de CO₂ par le sol (méthode de la chambre d'accumulation). On remarquera la présence d'émissions d'intensité modérée sur l'alignement SE-NO des cônes basaltiques. Note : l'échelle d'intensité (jusqu'à 2 ordres de grandeur plus élevée) sur le platier ne correspond pas à celle à Terre.

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.

- **En mer :**

Les analyses physico-chimiques des panaches de fluides détectés lors des campagnes océanographiques MAYOBS1-4 sont en cours à l'IFREMER. Des résultats détaillés seront

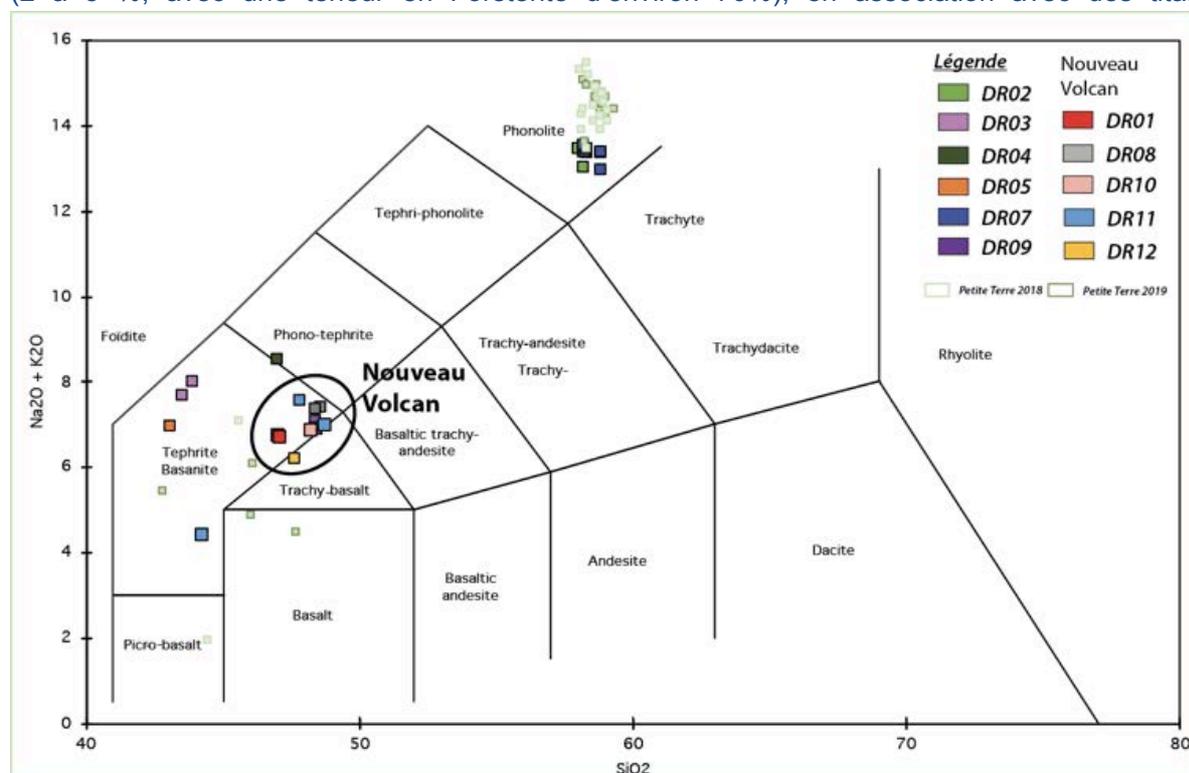
communiqués ultérieurement et seront comparés conjointement avec les données sur la composition des gaz émis sur Petite-Terre.

Pétrologie et géochimie des laves sous-marines :

Les analyses pétrologiques et géochimiques préliminaires, réalisées de juillet à septembre 2019, concernent des laves draguées lors des campagnes océanographiques MD220-MAYOBS-1, MD221-MAYOBS-2 et MD223-MAYOBS-4, 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. Ces échantillons sont comparés aux produits éruptifs subaériens du volcanisme récent de Petite-Terre (Di Muro et al., 2019). L'ensemble des laves analysées appartient à une série magmatique modérément à faiblement alcaline, caractéristique du volcanisme du nord de Mayotte (**Figure 11**). Ils montrent une variété compositionnelle, depuis les basanites (MAYOBS-4-DR09) jusqu'aux phonolites (MAYOBS-1-DR02, MAYOBS-2-DR07), 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 ($45 < \text{SiO}_2 \text{ pds}\% < 47$, **Figure 11**), légèrement évoluées (téphrites, $3,6 < \text{MgO pds}\% < 5,3$), 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 (MAYOBS-1-DR01, MAYOBS-4-DR10 et DR12), ou des coulées émises entre mai et juin 2019 (MAYOBS-2-DR08) et entre juin et juillet 2019 (MAYOBS-4-DR11, à l'exception d'un échantillon plus primitif dont l'origine doit encore être précisée).

La paragenèse et la composition des minéraux varient également peu. Les laves émises au cours de cette éruption sont majoritairement composées de verre (90 à 95%), de microcristaux d'olivine (2 à 5 %, avec une teneur en Forstérite d'environ 70%), en association avec des titano-



magnétites (2 à 5 % de la lave) et quelques microlites d'apatite (**Figure 12a et 12c**). De rares phénocristaux d'olivine, pouvant atteindre 2 mm, sont observés dans les produits des dernières coulées (mai à juillet 2019, MAYOBS-4-DR08 et MAYOBS-4-DR11). Ces cristaux présentent une

Figure 11 : Diagramme de classification des laves (somme des alcalins versus la teneur en silice).

zonation inverse avec une teneur en Forstérite évoluant de 55 % au cœur à 70 % en bordure. Les échantillons des dragues MAYOBS-1-DR02 et MAYOBS-2-DR07, prélevés sur les sites de la ride volcanique et plus proches de Mayotte, renferment des olivines plus ferrifères (Fo20), des feldspaths alcalins, des apatites et des titano-magnétites, en accord avec la composition des liquides (**Figure 12b et 12d**).

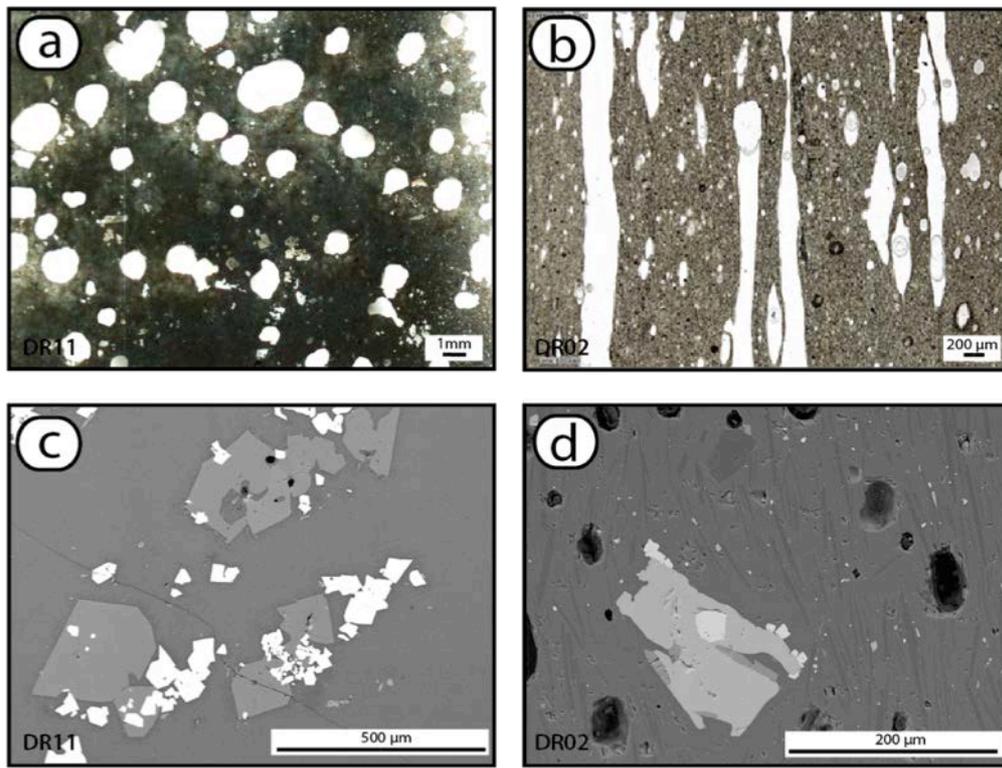


Figure 12 : a) MAYOBS-4-DR11, échantillon dragué sur le site actif présentant une texture riche en vésicules arrondies ; b) MAYOBS-1-DR02, dragué au niveau de la structure dite « fer à cheval » (site de la ride volcanique) présentant de nombreuses bulles ; c) Paragenèse observée dans l'échantillon MAYOBS-4-DR11 (site actif) et composée de microcristaux d'olivines en association avec de la titano-magnétite et des microlites d'apatite ; d) Olivine ferrifère, feldspaths alcalins et titano-magnétites et apatites observées dans les échantillons de la drague MAYOBS-1-DR02 (site de la ride volcanique)

Campagne de mesures magnéto-telluriques à terre à Mayotte :

Six stations électromagnétiques Magnéto-Télluriques ont été déployées sur Petite-Terre (deux stations) et dans son lagon (quatre stations) en mai 2019 afin de cartographier la structure électrique de l'île. L'intérêt de ce type de mesure réside dans la forte sensibilité de la conductivité électrique des roches à la présence de fluides. Le traitement préliminaire des données a permis de mettre en évidence un conducteur électrique en surface (<1km) très probablement associé à une zone d'altération hydrothermale. Il a également permis de mettre en évidence un conducteur à grande profondeur (>20km) qui pourrait s'expliquer par la présence d'une chambre magmatique. A la suite de cette campagne, deux stations de suivi Magnéto-Téllurique ont été installées sur Grande Terre et Petite-Terre afin d'identifier d'éventuelles variations de conductivité électrique associées à des remontées de fluides. Dans le cadre du REVOSIMA, une installation temporaire de stations magnéto-telluriques marines (collaboration P. Tarits, UBO-UBS, Brest) couplée avec les déploiements d'OBS est à l'étude pour une implémentation très prochaine sur plusieurs mois.

Phénoménologie

- **A Terre :**

Plusieurs campagnes de mesures, d'échantillonnages et d'observations ont été réalisées fin 2018 et en 2019 sur le terrain à Mayotte, à Grande-Terre et à Petite-Terre, dans le cadre des projets financés par l'AO de l'INSU Tellus Mayotte. Les résultats de ces missions sont en cours d'analyse. Ils permettront de mieux comprendre le contexte et la dynamique de la tectonique, ainsi que la mise en place et le dynamisme du volcanisme de Mayotte et leurs interactions. Ces données permettront de mieux analyser et suivre l'éruption en cours à Mayotte et son activité sismique en les intégrant dans leur contexte géologique. Ces connaissances sont fondamentales afin d'élaborer des scénarios plausibles d'évolution de cette éruption et de ces conséquences potentielles.

- **En mer :**

La dernière campagne Mayobs-5 (SHOM navire Beautemps-Beaupré du 21 août 2019 a permis d'acquérir de nouvelles données bathymétriques sur le site du volcan actif, la zone de l'essaim sismique actif proche de Petite-Terre ainsi que sur une bande entre ces deux zones. Les données sont en cours de traitement afin de réaliser des différences entre les levés bathymétriques successifs des campagnes IFREMER Mayobs2 et 4 et Mayobs5 du SHOM (Beautemps-Beaupré). Ces analyses permettront de quantifier d'éventuels changements de topographie engendrés par une éventuelle poursuite de l'émission de lave sur les sites actifs et de déceler d'éventuels changements de topographie sur d'autres zones.

En l'état actuel des connaissances, le nouveau site éruptif a produit au moins 5 km³ de lave depuis le début de son édification. Sur une période de 11 mois (de juillet 2018 - début des déformations de surface enregistrées à Mayotte - à juin 2019), le flux éruptif de lave est d'environ 150-200 m³/s. Les points de sorties distants ont produit environ 0,2 km³ de lave en 28 jours (18 mai-17 juin 2019) pour un flux minimum moyen de l'ordre de 80 m³/s. La nouvelle coulée identifiée à l'ouest du nouveau site éruptif (0,3 km³) s'est mise en place avec un flux approximatif de 80 m³/s sur 44 jours (entre le 17 juin et le 30 juillet 2019), voire plus. Après près d'un an d'éruption, ces flux éruptifs restent élevés. Ces **volumes et flux éruptifs sont exceptionnels et sont, compte tenu des incertitudes, globalement les plus élevés observés 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.

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-sismique-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-Presses/Communiqués-de-presses/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-RéNaSS) : <http://www.franceseisme.fr/>
- 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 sur le site web : www.ipgp.fr/revosima

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

IPGP et Université de Paris, BRGM, IFREMER, CNRS, BCSF-RéNaSS, IPGS et Université de Strasbourg, IGN, ENS, SHOM, TAAF, Météo France, CNES, Université Grenoble Alpes et ISTERre, Université Clermont Auvergne et OPGC, Université de La Réunion, Université Paul Sabatier, Toulouse et GET-OMP, IRD 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 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.

Références citées dans le bulletin :

- 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)
- Bertil et al., 2019, MAYEQSwarm2019 : BRGM earthquake catalogue for the Earthquake Swarm located East of Mayotte. 2018 May 10th - 2019 May 15th, <https://doi.org/10.18144/rmg1-ts50BrIOle> et al., 2008 : note de synthèse <http://volcano.terre.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
- 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 interne OVPF-IPGP du 04-04-2019
- Feuillet et al., Birth of a large volcano offshore Mayotte through lithosphere-scale rifting, papier en révision, *Nature*, Juin 2019
- Lemoine et al., The volcano-tectonic crisis of 2018 East of Mayotte, Comoros Island, papier soumis à *Geophys. J. Int.*, Feb 2019
- 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
- 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.
- Thordarson, Th, Self, S. (1993), The Laki (Skaftar Fires) and Grimsvötn eruptions in 1793-1785. *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](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](https://doi.org/10.1007/s10347-004-0040-7)

Le comité du REVOSIMA,
le 20 septembre 2019.