



Bulletin n°6 du 1 au 15 octobre 2019

ISSN : 2680-1205

## Bulletin de l'activité sismo-volcanique à Mayotte

### 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 22-50km. 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. A noter 2 séismes ressentis d'une magnitude voisine de 3,8 les 2 et 4 octobre à 30 et 42 km de profondeur et tous les deux situés à 14-15 km à l'est de Petite-Terre dans la zone de l'essaim sismique principal. 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. 18 à 21 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 2 mois sur certaines stations notamment sur celles de Petite Terre.*

**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.

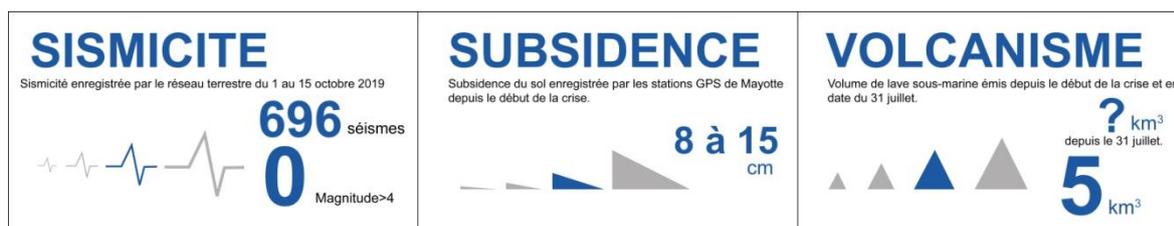
**Il est fondamental de reporter tout séisme ressenti au BCSF-RENASS sur le site :** <http://www.franceseisme.fr/>

*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°54' ; longitude: 45°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 (OVVP-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 essaïms avec des épïcêtres regroupés en mer, entre 5 et 15 km à l'est de Petite-Terre pour l'essaïm 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 a pugnérer jusqu'à plusieurs séismes de magnitudes proches de  $M_4$  ressentis par mois. Du 1 au 15 octobre 2019, la sismicité est restée similaire (nombre et localisation) à celle enregistrée lors de la période du 15 au 30

septembre 2019, les magnitudes n'ont pas dépassées 3,9. Deux séismes ont été ressentis le 02 octobre à 09h56 TU (12 :29 heure locale) d'une magnitude  $M_L=3,9$ , localisé à une profondeur de 42,0 km et à une distance de 15 km à l'est de Petite-Terre, dans la zone de l'essai sismique le plus actif (Figure 2) proche de la zone dite de la « Molaire » ; et le 04 octobre à 17h47 TU (20:47 heure locale) d'une magnitude  $M_L=3,7$  localisé à une profondeur 29,9 km et à une distance de 14 km à l'est de Petite-Terre dans la zone de l'essai sismique le plus actif (Figure 3) proche de la zone dite de la « Molaire »

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. 18 à 21 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 les deux derniers 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 90 km à l'est Mayotte et à une profondeur comprise entre 20 et 50 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'essai 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<sup>3</sup> 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 150-200 m<sup>3</sup>/s. Les points de sorties distants ont produit environ 0,2 km<sup>3</sup> de lave en 28 jours (18 mai-17 juin 2019) pour un flux minimum moyen de l'ordre de 80 m<sup>3</sup>/s. Entre le 17 juin et le 30 juillet 2019 le flux éruptif est estimé également de l'ordre de 80 m<sup>3</sup>/s (0,3 km<sup>3</sup>). 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<sub>2</sub>) 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 (pour plus de détails voir le bulletin N° 4 du REVOSIMA : [www.ipgp.fr/revosima](http://www.ipgp.fr/revosima)).

7. 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).

8. 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 ( $45 < \text{SiO}_2 \text{ pds\%} < 47$ ), 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).

9. La province volcanique sous-marine proche de l'île de Mayotte représente un enjeu majeur dans la compréhension de l'aléa lié à la crise éruptive actuelle. L'analyse d'un échantillon de lave phonolitique très peu ou pas altérée et d'apparence très récente, qui provient de la drague DR07 prélevée dans la zone de l'essai sismique 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 :  $(^{210}\text{Pb}/^{226}\text{Ra}) = 1.03 \pm 0.04$  (2 sigma) et  $(^{210}\text{Po}/^{210}\text{Pb}) = 1.21 \pm 0.05$  (2 sigma), tels que mesurés en septembre 2019 (voir pour plus de détails le bulletin REVOSIMA N° 5, [www.ipgp.fr/revosima](http://www.ipgp.fr/revosima)). La phonolite DR07 présente un déséquilibre  $^{210}\text{Po}$ - $^{210}\text{Pb}$  significatif, ce qui implique nécessairement que ce système isotopique était ouvert jusqu'il y a moins de 2,3 ans. De surcroît, l'absence de déficit en  $^{210}\text{Pb}$  par rapport à  $^{226}\text{Ra}$  démontre que le déséquilibre  $^{210}\text{Po}$ - $^{210}\text{Pb}$  n'est pas dû à une perte en  $^{210}\text{Pb}$  mais bien à un excès de  $^{210}\text{Po}$ . L'hypothèse retenue à ce jour est donc celle d'une fertilisation d'un magma de type phonolitique (DR07) par des gaz magmatiques issus d'un magma plus mafique (i.e. moins évolué chimiquement) injecté en profondeur, à l'instar de ce qui a été observé lors de l'éruption de l'Eyjafjallajökull en Islande en 2010 (Sigmarsson et al., 2015). Le processus ne peut pas, en l'état, être modélisé à partir d'une seule analyse sur un seul échantillon. Néanmoins, si le fractionnement est bien lié à un transfert de gaz entre réservoirs magmatiques, cela implique que ce processus a eu lieu il y a moins de 2,3 ans et donc, qu'une éruption phonolitique a eu lieu dans la zone de l'essai sismique actif (Fer à cheval) depuis 2017. La mise en perspective de ces nouvelles données géochimiques et géochronologiques avec les relevés bathymétriques pose néanmoins questionnement puisque la morphologie et la topographie du fond marin dans cette zone ne semble pas avoir significativement changé depuis 2014. De nombreuses analyses restent à réaliser, à interpréter et à intégrer dans le corpus actuel de connaissance sur le volcanisme à Mayotte. Malgré les nombreuses questions scientifiques en suspens et des incertitudes intrinsèques à la compréhension des systèmes géologiques complexes, ces nouvelles données viennent 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.

10. 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](http://www.ipgp.fr/sites/default/files/190823_1er_bulletin_info_sismo_volcanique_mayotte.pdf))

Entre le 1 et le 15 octobre 2019, le Réseau Volcanologique Sismologique de Mayotte (REVOSIMA) a détecté, avec le réseau de stations terrestres, un total de 696 séismes (voir **Figure 1**) de magnitude  $M \geq 1$  entre Mayotte et le nouveau site éruptif à 50 km au sud-est de Mayotte. Au total, 288 séismes ont pu être localisés (voir **Figure 2**) dont 110 de magnitude  $M_2$  à  $M_3$ .

Ramené à des valeurs moyennes quotidiennes on note, entre le 1 et le 15 octobre, une moyenne de **19** séismes localisables par jour, dont **8** séismes/j de magnitude  $\geq M_2$  et seulement **1** séisme/jour de magnitude  $\geq M_3$ .

- 124 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 22 et 50 km (voir **Figures 1, 2 et 3**) dont 14 séismes de magnitude  $M \geq 3$  et aucun (0) séisme d'une magnitude  $M \geq 4$  (voir **Tableaux 1 et 2**).
- A noter 2 séismes ressentis d'une magnitude voisine de 3,8 :
  1. le 02 octobre à 09h56 TU (12 :29 heure locale) d'une magnitude  $M_L = 3,9$ , localisé à une profondeur de 42,0 km et à une distance de 15 km à l'est de Petite-Terre, dans la zone de l'essaim sismique le plus actif (**Figure 2**) proche de la zone dite de la « Molaire »
  2. le 04 octobre à 17h47 TU (20:47 heure locale) d'une magnitude  $M_L = 3,7$  localisé à une profondeur 29,9 km et à une distance de 14 km à l'est de Petite-Terre dans la zone de l'essaim sismique le plus actif (**Figure 2**) proche de la zone dite de la « Molaire »
- **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 octobre 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 30 septembre détectés selon le même protocole)	
Classe de magnitude	Nombre de Séismes VT
M < 1,0	0(0)
M1,0 à M2,0	164 (146)
M2,0 à M3,0	110 (124)
M3,0 à M4,0	14(11)
M4,0 à M5,0	0(0)
M5,0 à M6,0	0(0)
M1,0-M6,0	288 (281)
M>= 2,0	124 (135)

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

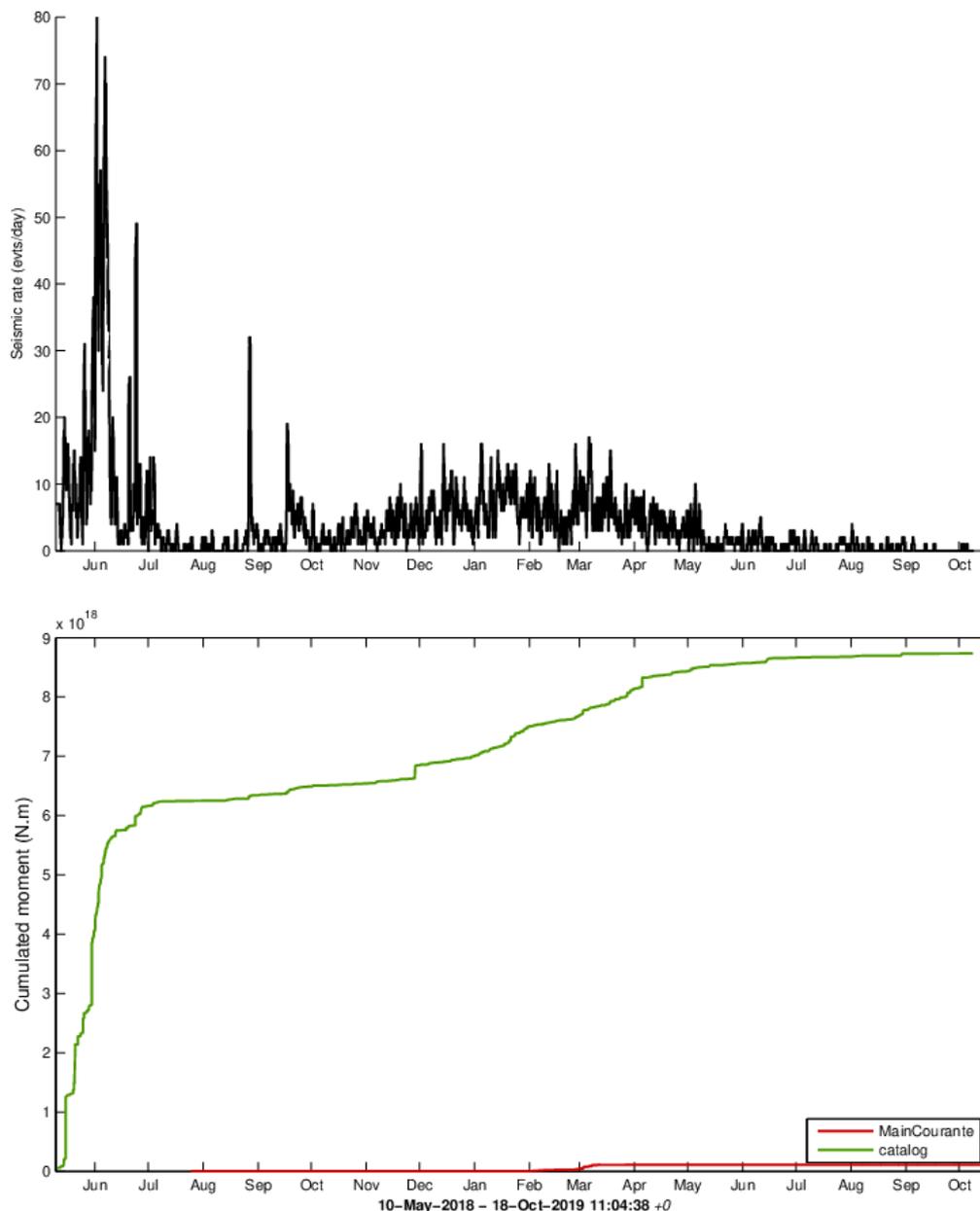
Total séismes >= M3,5	Dont M >= 4,0	Dont M >= 4,5	Dont M >= 5,0	Dont M >= 5,5
2002	551	149	32	2

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

- Si l'activité sismique reste globalement stable sur les dernières semaines (**Figures 1 et 2**), 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 (1,3-2,8) sont toujours enregistrés entre l'essaim sismique principal 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.

Mayotte statistiques sismicité – M>3.5 – Seismic rate and swarms (Ref.)

© IPGP, 2019 + © ReVoSiMa, 2019



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

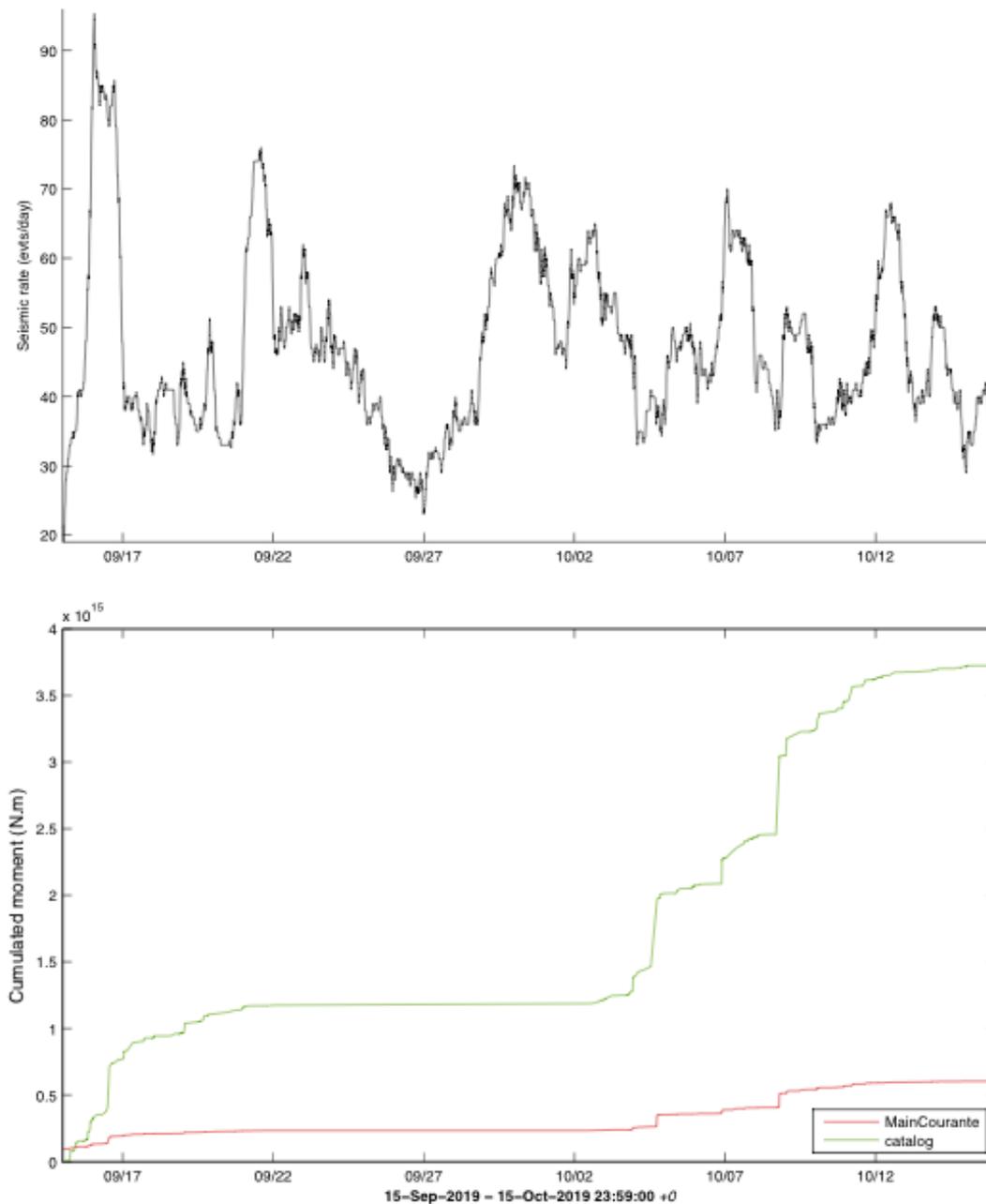
Last event: 18-Oct-2019 01:16:51 +0

PROC.MCSTATSMAYOTTE\_BIGMAG / mc3mayotte\_ref - webobs@saba - 18-Oct-2019 11:04:38 +0 - mc3stats.m (2019-04-22) / WebObs project (Beauducel et al., 2001-2019)

**Figure 1** : En haut : Evolution temporelle du taux instantané de sismicité (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) depuis le début de l'activité sismique en cours le 10 mai 2018. 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).

## Mayotte statistiques sismicité – M>0 – Seismic rate and swarms

© IPGP, 2019 + © ReVoSiMa, 2019



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

Last event: 18-Oct-2019 01:16:51 +0

PROC.MCSTATSMAYOTTE / mc3mayotte\_ -- webobs@xaba -- 18-Oct-2019 10:52:41 +0 -- mc3stats.m (2019-04-22) / WebObs project (Beauducel et al., 2001-2019)

**Figure 2** : En haut : Evolution temporelle du taux instantané de sismicité ( $M > 0$ ) calculé sur une fenêtre de 24h glissante toutes les 10 minutes, du 15 septembre au 15 octobre 2019. En bas: Evolution temporelle du moment sismique cumulé, en N.m (représentant le cumul de l'énergie dissipée par l'ensemble des séismes) depuis le 15 septembre 2019 (© OVPF-IPGP et REVOSIMA). 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).

Localisation

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

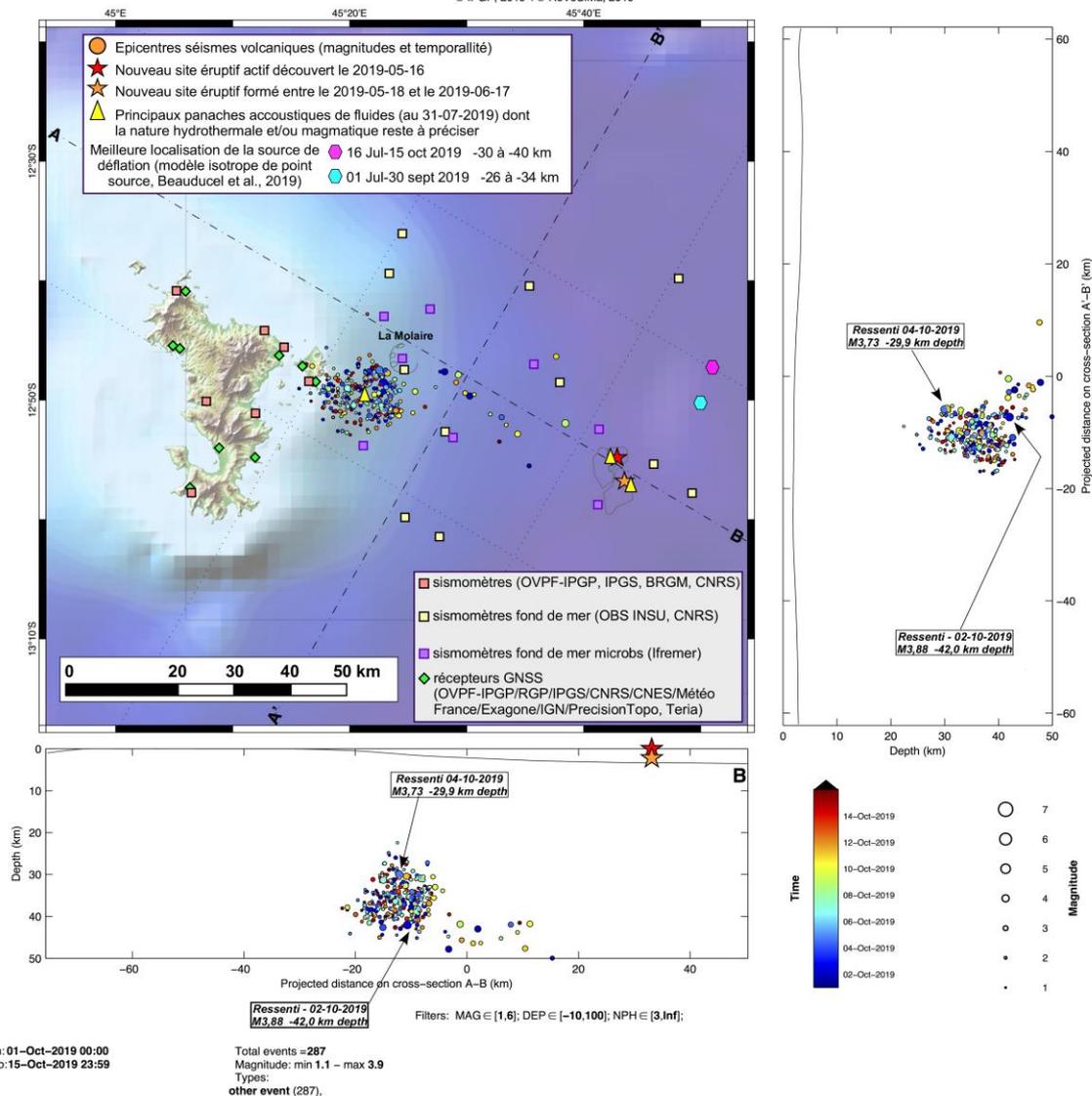
other event (287).

PROC.HYPOMAYOTTE / MayotteZoomTime\_ - webobs@saba - 18-Oct-2019 08:45:29 +0 - hypomap.m (2018-08-02) / WebObs project (Beauducel et al., 2001-2019)



Mayotte time evolution - swarm

© IPGP, 2019 + © ReVoSiMa, 2019



**Figure 3:** Carte de localisation des épicentres ( $\pm 5$  km) des séismes volcano-tectoniques avec les réseaux sismiques à terre (IPGP-IFREMER-CNRS-BRGM-BCSF-RéNaSS, IPGS) entre le 1 et le 15 octobre 2019 (15 jours) (échelle temporelle de couleur) et coupes transversales et axiales le long de la ride montrant la localisation estimée en profondeur (précision variant entre  $\pm 5$  km et  $\pm 15$  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. Les structures volcaniques de la zone dite de « La Moïra » sont indiquées en grisé tout comme les coulées de lave du site éruptif actuel. La position des meilleurs modèles de source en déflation (dégonflement) issues des modélisations (modèle isotrope point source) sur des périodes de temps choisies est indiquée par des polygones de couleur (rose : 2019-07-16/2019-10-15 ; bleu : 2019-07-01/2019-09-30) avec la profondeur associée en km. 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 / REVOSIMA).

## 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 KAWA, 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 4 et 5**). 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 les 45 derniers jours, l'affaissement (subsidence) semble même s'être stabilisé sur certaines stations, ce paramètre sera à suivre et à confirmer dans le futur (Figure 5)*. Des calculs automatiques et journaliers ont été mis en place à l'IPGP (via les logiciels GipsyX et Webobs ; *Beauducel et al., 2010*) afin de suivre ces déplacements, et modéliser une source de déformation en temps-réel (*Beauducel et al., 2014*). 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 6**).

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 90 km à l'est Mayotte et à une profondeur comprise entre 30 et 40 km à 95% de probabilité (**Figure 6**). Comparativement au début de la crise, et si l'on considère une source unique celle-ci semble être plus superficielle qu'en début de crise même si sur la dernière quinzaine une diminution de profondeur est observée. Sur les derniers quinze jours les débits associés aux meilleurs modèles seraient compris entre -75 à -130 m<sup>3</sup>/s (**Figure 7**). A noter que s'agissant d'une source en déflation, les évolutions de position de la source vers des profondeurs plus superficielles ne traduisent pas une migration de source mais pourraient être liées à l'effet de la fermeture d'un conduit (se faisant progressivement depuis le bas vers le haut).

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.

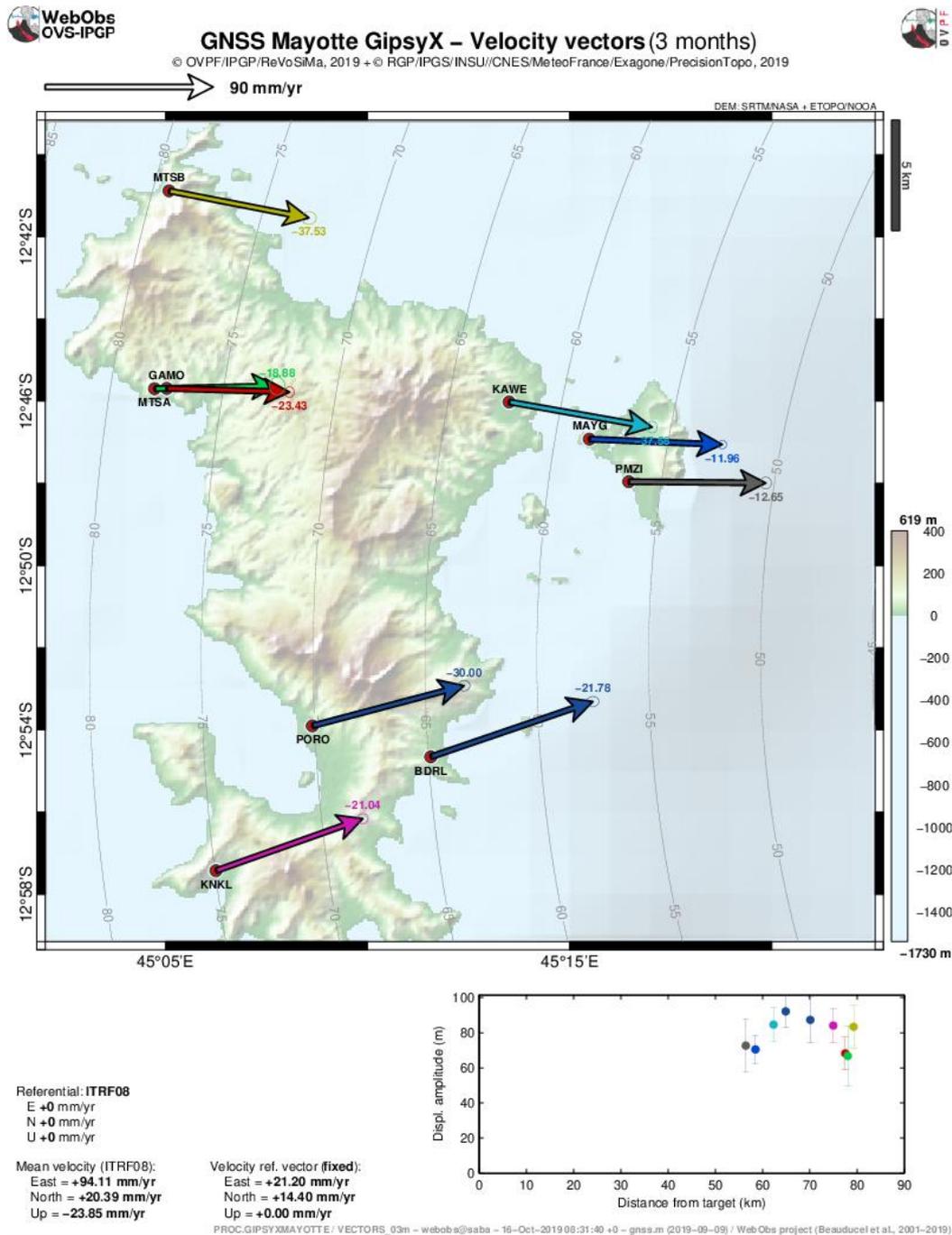
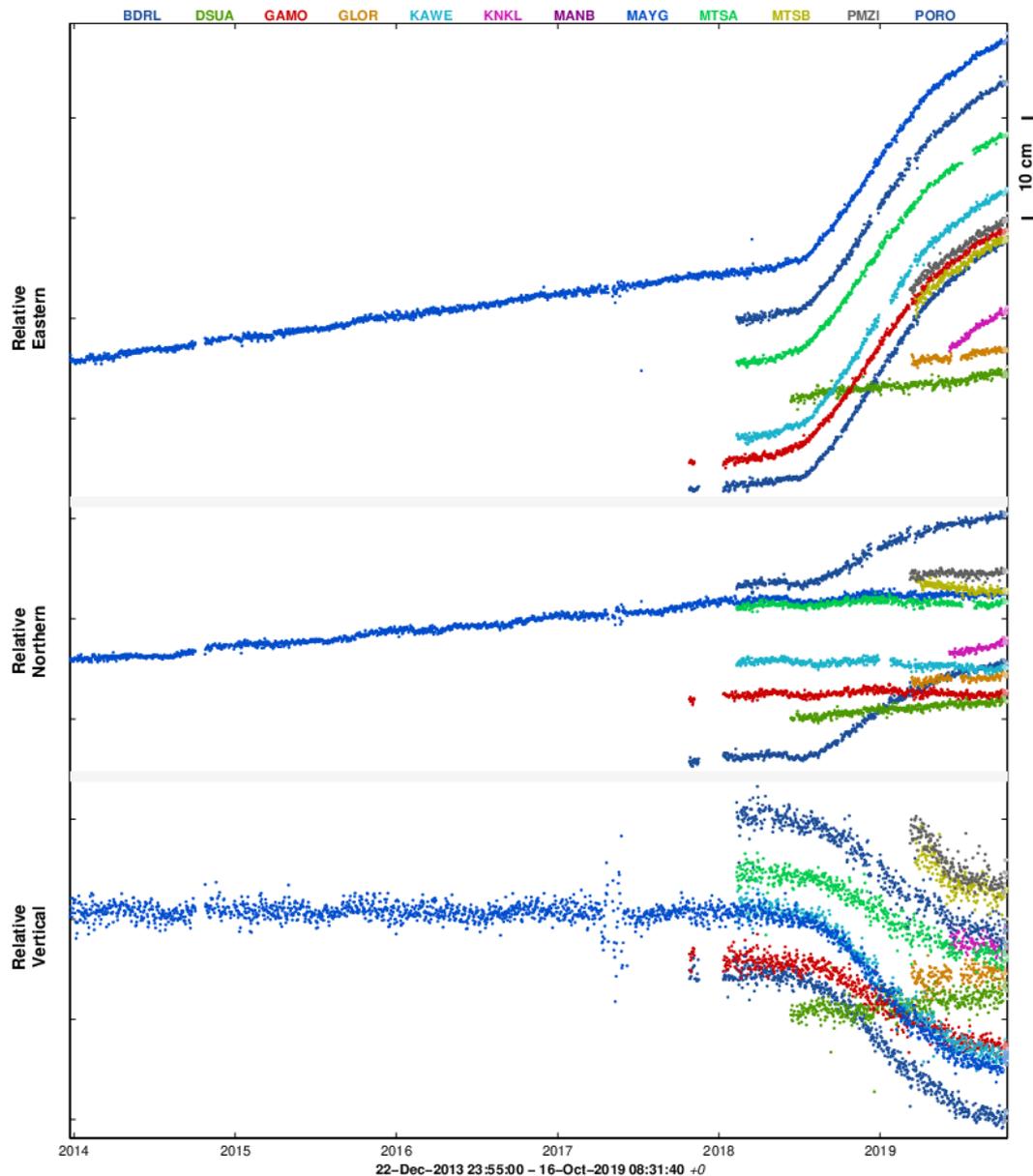


Figure 4 : Déplacements du sol enregistrés sur les stations GPS de Mayotte au cours des 3 derniers mois du 16-07-2019 au 15-10-2019. Les déplacements horizontaux sont représentés sous forme vectorielle et les déplacements verticaux sont indiqués par les valeurs chiffrées en couleur. Post-traitement de ces données réalisé par l'IPGP (@OVPF-IPGP / REVOSIMA).



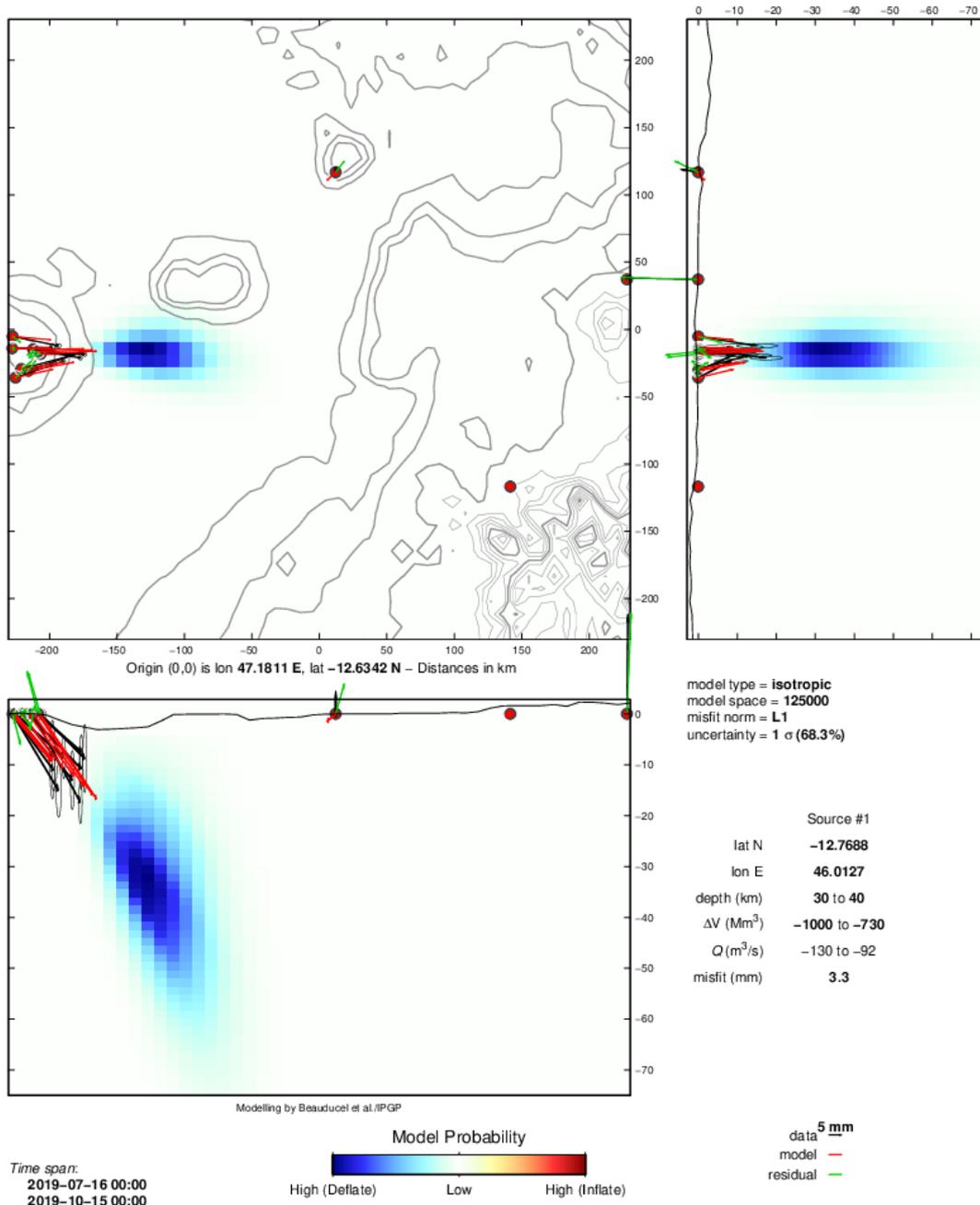
Referential: ITRF08  
E +0 mm/yr  
N +0 mm/yr  
U +0 mm/yr

PROC.GIPSYX/MAYOTTE / \_all - webobs@saba - 16-Oct-2019 08:31:40 +0 - gnss.m (2019-09-09) / Web Obs project (Beauducel et al., 2001-2019)

**Figure 5 :** Déplacements (en cm) enregistrés sur 9 stations GPS localisés à Mayotte (BDRL, GAMO, KAWE, KNKL, MAYG, MTSB, PMZI, PORO), 1 station à Grande Glorieuse (GLOR) et 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 octobre 2019, et pour la station MAYG avec des données datant de janvier 2017 pour visualiser une longue série temporelle anté-crise. Post-traitement de ces données réalisé par l'IPGP (©OVPF-IPGP / REVOSIMA).

**GNSS Mayotte GipsyX – Source modelling**

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

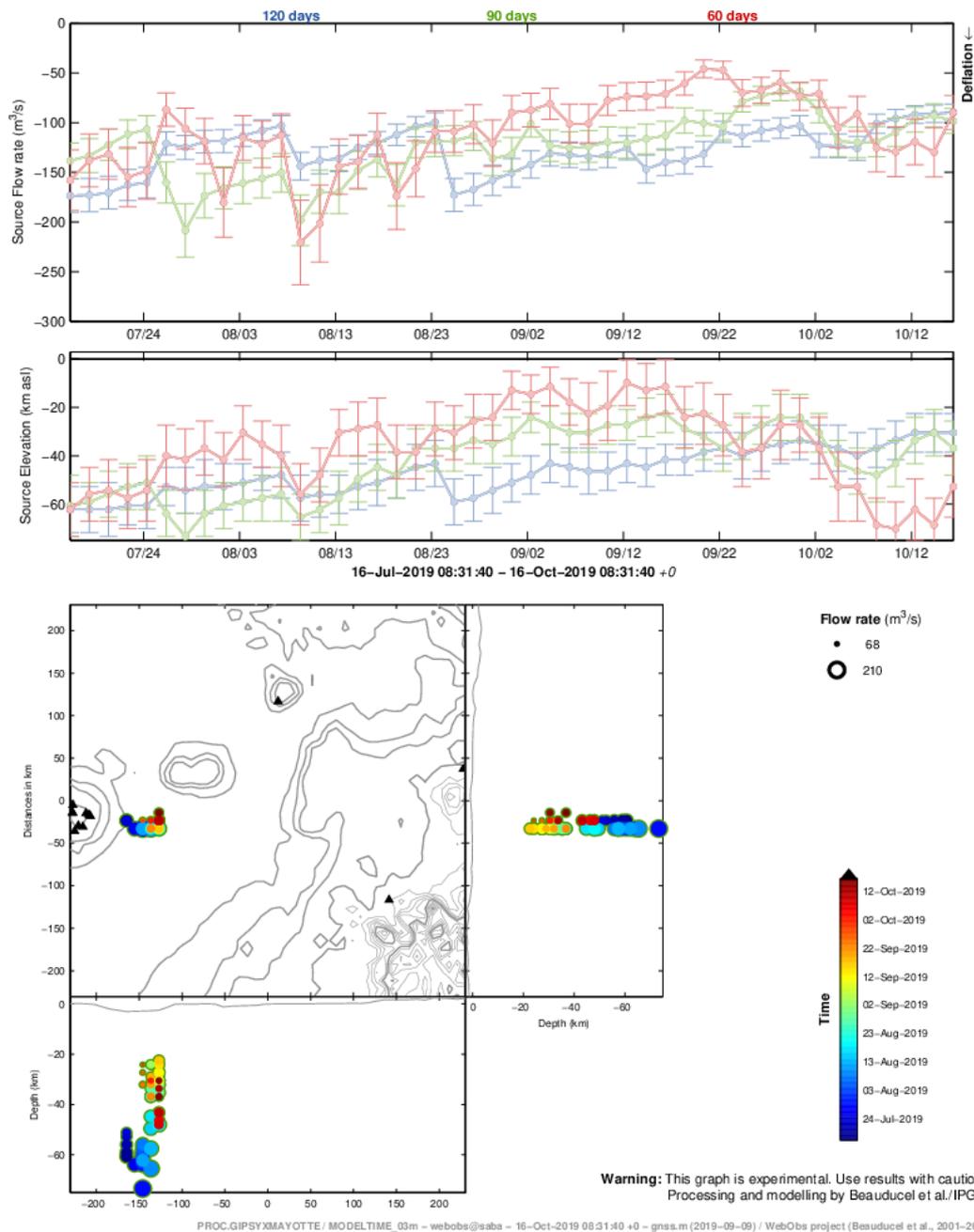


PROC.GIPSYXMAYOTTE / MODELLING\_ - webobs@saba - 16-Oct-2019 08:55:50 +0 - gnss.m (2019-09-09) / WebObs project (Beauducel et al., 2001-2019)

**Figure 6:** 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 la période : 16 juillet - 15 octobre 2019, 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 m<sup>3</sup> (Mm<sup>3</sup>) 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 m<sup>3</sup>/s de magma associé à la déflation. Modélisations réalisées par F. Beauducel (IPGP/IRD) et OVSP-IPGP (©REVOSIMA).

**GNSS Mayotte: Source best model timeline (3 months)**

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



**Figure 7 :** Évolution spatio-temporelle du meilleur modèle de la source des déformations sur les trois derniers mois. Attention ce graphique ne prend pas en considération les incertitudes du modèle. Chaque point du graphe correspond au résultat d'une modélisation de la source prédominante calculée à partir des données GPS sur une période intégrée de 60 jours (rouge), 90 jours (vert) ou 120 jours (bleu). Le graphe supérieur indique le débit magmatique estimé (en mètres cube par seconde). Le graphe intermédiaire indique la profondeur de la source (en km sous le niveau de la mer). Le graphe inférieur représente les projections horizontale (vue du dessus) et verticales (vues du sud et de l'est) des sources, la taille de chaque marqueur correspondant au débit magmatique ("Flow rate"), et la couleur à la date la plus récente des données utilisées pour chaque modèle (bleu foncé = 16 juillet 2019, rouge foncé = 15 octobre 2019). Les barres d'erreur indiquent l'écart de l'incertitude sur les paramètres à 68% de probabilité. Modélisations réalisées par F. Beauducel (IPGP/IRD) et OVPF-IPGP (©REVOSIMA).

## 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. Le secteur principal d'émissions de gaz riches en CO<sub>2</sub> est celui dit de « La plage de l'aéroport » au nord-est de l'aéroport et proche de l'usine de désalinisation. Ces points vont être ré-échantillonnés régulièrement lors des prochaines missions pour un suivi régulier de leur évolution temporelle. Pour plus de détails voir les bulletins N° 1 et N° 4 du REVOSIMA ([www.ipgp.fr/revosima](http://www.ipgp.fr/revosima)). Un site a été établi pour l'installation d'une station de mesure en continue du flux de CO<sub>2</sub> dans le sol sur le site de l'usine de désalinisation à Petite-Terre. Elle sera installée dès que possible.

Le CO<sub>2</sub> 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<sub>2</sub> 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 de finalisation à l'IFREMER. Les premiers résultats seront communiqués dans le bulletin N° 7.

## 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 km<sup>3</sup> 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 m<sup>3</sup>/s. Les points de sorties distants ont produit environ 0,2 km<sup>3</sup> de lave en 28 jours (18 mai-17 juin 2019) pour un flux minimum moyen de l'ordre de 80 m<sup>3</sup>/s. La nouvelle coulée identifiée à l'ouest du nouveau site éruptif (0,3 km<sup>3</sup>) s'est mise en place avec un flux approximatif de 80 m<sup>3</sup>/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 m<sup>3</sup>/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-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](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/Communiqués-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-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](http://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  
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 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.
- 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-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](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](http://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
- 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, papier en révision, *Nature*, Juin 2019
- 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., 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), 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.
- Sigmarsson et al. (2015), *EPSL*, doi : 10.1016/j.epsl.2015.06.054
- Thordarson, Th, Self, S. (1993), The Laki (SkaftarFires) and Grimsvötn éruptions in 1793-1795. *Bull Volcanol*, 55 :233-263
- Traineau et al., (2006), Etat des connaissances du potentiel géothermique de Mayotte, BRGM/RP-54700-FR, 81 p., 31 ill., 2 ann.
- Zinke 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 Lagoon of Mayotte (Comoro Archipelago, SW Indian Ocean). *Facies* 50:391-408 DOI 10.1007/s10347-004-0040-7

Le comité du REVOSIMA,  
le 18 octobre 2019.